



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

AMBIENTAL – AIRE

**INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS EN EL DEPÓSITO
ATMOSFÉRICO HÚMEDO EN LA ZONA METROPOLITANA DE
LA CIUDAD DE MÉXICO.**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

Lic. DAIMY AVILA RODRÍGUEZ

TUTOR PRINCIPAL:

Dr. RODOLFO SOSA ECHEVERRÍA, CCA. UNAM

COMITÉ TUTOR

Dra. GEORGINA FERNÁNDEZ VILLAGÓMEZ, FACULTAD DE INGENIERÍA. UNAM

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

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

Dr. ARMANDO AGUILAR MÁRQUEZ, FES, CUAUTITLÁN. UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA. CDMX, SEPTIEMBRE 2018.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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

Vocal: Dr. Armando Aguilar Márquez

1 er. Suplente: M.C. Vicente Fuentes Gea

2 d o. Suplente: Dr. Rodolfo Sosa Echeverría

Lugar o lugares 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 Dios y a mi viejito Lázaro por su amor infinito y guiarme por el camino correcto, por estar conmigo en todo momento, por darme salud y bendición para alcanzar mis metas personales y profesionales.

A mis padres por brindarme su cariño, amor y apoyo incondicional, por sus consejos y palabras de aliento, por ser el principal cimiento para la construcción de mi vida profesional y enseñarme a luchar por lo que quiero.

A mi esposo por el apoyo, amor y comprensión en los momentos difíciles, por ser el sol en mis días oscuros, por amarme tanto.

Al resto de mi familia y amigos por confiar en mí y disfrutar también de este momento.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México y al Posgrado de Ingeniería por su apoyo y la oportunidad de crecer profesionalmente.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT de la DGAPA-UNAM, mediante el proyecto titulado “Evaluación del Depósito Atmosférico Húmedo y Seco en la ZMCM 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 Deposito Atmosférico” (IN112318) por el soporte económico brindado.

Debo agradecer de manera especial al Dr. Rodolfo Sosa Echeverría por aceptarme para realizar esta tesis de Maestría bajo su dirección. Su guía, apoyo y confianza en mi trabajo ha sido un aporte invaluable, en el desarrollo de esta tesis y también en mi formación como investigador.

A mi comité tutorial Dra. Georgina Fernández V., M.C. Vicente Fuentes Gea, Dr. Víctor O. Magaña Rueda y Dr. Armando Aguilar Márquez, quienes me guiaron y me atendieron cada vez que tenía duda, por confiar en mí, por darme su ayuda incondicional en cada momento sin importar el poco tiempo disponible y el gran número de compromisos y dificultades propios del día a día.

A la M. en I. Ana Luisa Alarcón Jiménez y a la QFB. María del Carmen Torres Barreda por enseñarme como trabajar en el laboratorio, por brindarme sus conocimientos los cuales me acercaron un poco más a la Química Atmosférica, por sus revisiones de la tesis las cuales me ayudaron a perfeccionarla y sobre todo por su ayuda en el tratamiento analítico de los datos utilizados en esta tesis. Al resto de compañeros de la SCA-CCA-UNAM, Gilberto Fuentes, Elías Granados y Pablo Sánchez Alvares por la revisión y sugerencias a mi trabajo de maestría.

A mis amigos de la maestría en especial a Orlando, Daynier, Evelyn, Milena, Alejandro, Arisleydis, Dalina, Yoel y Anayli, por cada momento que pasamos juntos, por sus consejos, regaños y por aceptarme como una amiga. A mi amiga Raquel y su familia por ser esas maravillosas personas que no siempre se encuentran, pero que tuve la bendición de tener tan cerca.

RESUMEN

El depósito atmosférico húmedo en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) constituye un problema con gran repercusión ambiental por sus efectos considerables en los ecosistemas y en el patrimonio cultural. El entendimiento de las emisiones atmosféricas y de las condiciones meteorológicas propias del área de estudio permite conocer cuáles son las condiciones específicas que lo agravan y brinda una herramienta clave para disminuirlo y así proteger el ambiente.

El objetivo de este estudio consistió en evaluar la influencia de las condiciones meteorológicas en el depósito atmosférico húmedo en la ZMCM. Las muestras de lluvia utilizadas en este estudio fueron colectadas semanalmente por la Red de Depósito Atmosférico (REDDA) en el período 2013-2016 y analizadas en el laboratorio de SCA-CCA-UNAM. La información meteorológica se obtuvo de los registros de datos meteorológicos de la Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET). El análisis químico de las muestras en el laboratorio de la SCA-CCA-UNAM consistió en la determinación de los parámetros recomendados por el protocolo del NADP, los cuales son: pH, conductividad eléctrica, concentración de cationes: Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} y concentración de aniones: Cl^- , NO_3^- y SO_4^{2-} , encontrándose que el NH_4^+ fue el de mayor concentración ($\mu\text{Eq/L}$), mientras que el SO_4^{2-} fue el de mayor depósito (kg/ha) y que en la regiones al sur de la ZMCM se encuentran los pH más ácidos. Además, se analizaron las relaciones entre las variables meteorológicas y las concentraciones de los iones estudiados mediante el método de correlación de Spearman obteniéndose que el SO_4^{2-} presentó mayor contribución a la acidez de la lluvia y que el Ca^{2+} fue el que más contribuyó a la neutralización de los compuestos ácidos presentes en la lluvia. Igualmente, la correlación mostró que a mayor temperatura se presenta mayor pH y mayores concentraciones de iones, mientras que, a mayor precipitación y humedad relativa menor pH y menor concentración de iones. Se identificó mediante el modelo HYSPLIT que las zonas de procedencia de los precursores de lluvia ácida son las del norte (N), norte-noroeste (NNO) y norte-noreste (NNE) y por último, se propusieron medidas como el uso de combustibles fósiles con menor cantidad de azufre en sectores energéticos e industriales tanto en la ZMCM como en fuentes externas, con el fin de minimizar, prevenir y controlar los precursores de lluvia ácida y así reducir el impacto del depósito atmosférico húmedo en los ecosistemas y en el patrimonio cultural de la ZMCM.

ABSTRACT

In the Mexico City Metropolitan Zone (MCMZ) the wet atmospheric deposition is a problem with great environmental impact due to its potential effects on ecosystems and cultural heritage. The understanding of the atmospheric emissions and the meteorological conditions of the study area allows us to know which are the specific conditions that aggravate it and gives us a key tool to reduce it and thus protect the environment.

The objective of this study was to evaluate the influence of meteorological conditions on the wet atmospheric deposition in the MCMZ. The rain samples were collected by the Wet Atmospheric Deposit Network (REDDA) in the period 2013-2016 and analyzed in the SCA-CCA-UNAM laboratory. Meteorological information was obtained from the Meteorology and Solar Radiation Network (REDMET). The chemical analysis of the samples consisted in the determination of the parameters recommended by the NADP protocol, which are: pH, electrical conductivity, concentration of cations (Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) and anions (Cl^- , NO_3^- and SO_4^{2-}). The NH_4^+ was the ion with the highest concentration ($\mu\text{Eq/L}$), while SO_4^{2-} present the highest deposition (kg/ha). The South region of the MCMZ showed the most acid pH. In addition, the relationships between the meteorological variables and the ion concentrations were analyzed by the Spearman correlation method, obtaining that the SO_4^{2-} presented a greater contribution to the acidity of the rain and that the Ca^{2+} contributed to the neutralization of acidic compounds. Likewise, the correlation showed that at higher temperature, the pH and ions concentration are higher, while to a greater precipitation and relative humidity, pH and ions concentration are lower. Through the HYSPLIT model, it was identified that the zones of origin of the acid rain precursors are those of the north (N), north-northwest (NNO) and north-northeast (NNE). Finally, measures were proposed such as the use of fuels fossils with less sulfur in energy and industrial sectors both in and outside MCMZ, in order to minimize, prevent and control acid rain precursors and hence reduce the impact of wet atmospheric deposition on ecosystems and heritage of the MCMZ.

CONTENIDO

RESUMEN	V
ABSTRACT	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	X
ABREVIATURAS, ACRÓNIMOS Y SIGLAS	XII
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	XIII
1.1 Introducción	14
1.2 Objetivos	16
1.2.1 General	16
1.2.2 Específicos	16
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	17
2.1 Atmósfera terrestre	18
2.1.1 Composición química de la atmósfera	19
2.2 Contaminación atmosférica	20
2.3 Depósito atmosférico	22
2.4 Lluvia ácida	23
2.4.1 Precursores de lluvia ácida	25
2.4.1.1 Dióxido de Azufre en la Ciudad de México	25
2.4.1.2 Óxidos de Nitrógeno en la Ciudad de México	26
2.4.2 Proceso de formación de la lluvia ácida	27
2.4.3 Efectos ambientales de la lluvia ácida	28
2.5 Relación entre las variables meteorológicas y el depósito atmosférico húmedo ...	29
2.6 Modelación numérica de trayectorias de retroceso	30
2.6.1 HYSPLIT	31
CAPÍTULO III. ÁREA DE ESTUDIO	33
3.1 Localización del área de estudio	34
3.2 Clima y variables meteorológicas	35
3.3 Suelo y vegetación	36
3.4 Isla de calor	37
3.5 Aspectos socio-económicos	38

CAPÍTULO IV. MATERIALES Y MÉTODOS	40
4.1 Muestreo.....	41
4.1.1 Red de muestreo de Depósito Atmosférico	41
4.1.2 Programa de aseguramiento de calidad y control de calidad (QA/QC)	43
4.1.3 Colección de la muestra.....	45
4.2 Análisis químico de las muestras	46
4.2.1 Tratamiento de los resultados de análisis químicos.....	48
4.3 Datos de variables meteorológicas	49
4.4 Métodos y softwares estadísticos utilizados.....	51
4.4.1 Análisis de correlación mediante el método de Spearman	51
4.4.2 Softwares estadísticos.....	52
4.5 HYSPLIT	54
CAPÍTULO V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	57
5.1 Introducción.....	58
5.2 Comportamiento de las variables meteorológicas en la ZMCM.....	58
5.2.1 Temperatura.....	61
5.2.2 Humedad Relativa.....	62
5.2.3 Velocidad y dirección del viento.....	64
5.2.4 Precipitación.....	66
5.3 Variabilidad espacial y temporal del pH, conductividad eléctrica y componentes químicos de la precipitación en la ZMCM.....	67
5.3.1 Variabilidad espacial y temporal del pH y conductividad eléctrica.....	67
5.3.2 Análisis espacial y temporal de los iones mayoritarios en las precipitaciones de la ZMCM.....	72
5.3.2.1 Concentraciones de SO_4^{2-} en $\mu Eq/L$ en la ZMCM.....	73
5.3.2.2 Concentraciones de NO_3^- en $\mu Eq/L$ en la ZMCM	76
5.3.2.3 Concentraciones del ion NH_4^+ en $\mu Eq/L$ en la ZMCM.....	77
5.3.3 Análisis espacial y temporal del depósito atmosférico húmedo	79
5.3.4.1 Depósito de los iones SO_4^{2-} , NO_3^- y NH_4^+ en kg/ha en la ZMCM.....	80
5.4 Relación entre las variables meteorológicas y los iones presentes en la lluvia	84
5.4.1 Correlación entre la precipitación y los iones H^+ , NH_4^+ , NO_3^- y SO_4^{2-}	87
5.4.2 Correlación entre la temperatura y los iones H^+ , NH_4^+ , NO_3^- y SO_4^{2-}	89
5.4.3 Correlación entre la humedad relativa y los iones H^+ , NH_4^+ , NO_3^- y SO_4^{2-}	91

5.4.4 Correlación entre la velocidad del viento y los iones H^+ , NH_4^+ , NO_3^- y SO_4^{2-}	93
5.5 Regiones de procedencia de los precursores de lluvia ácida que causan depósito atmosférico húmedo en la ZMCM	95
5.5.1 Trayectorias de retroceso para eventos ácidos y máximas concentraciones de SO_4^{2-}	97
5.5.2 Trayectorias de retroceso para eventos alcalinos	101
5.6 Propuesta de medidas de prevención, minimización y control de los precursores de lluvia ácida.....	104
CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	106
6.1. Conclusiones	107
6.2. Recomendaciones	108
CAPÍTULO VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	110
ANEXOS	119
A.I. Concentraciones ponderadas anuales de los iones de lluvia analizados en $\mu Eq/L$	120
A.II. Acumulado anual del depósito de los iones de lluvia analizados en kg/ha	123
A.III. Correlaciones entre las variables meteorológicas y los iones de lluvia por estaciones de muestreo.....	125
A.IV. Trayectorias de retroceso con el modelo HYSPLIT	128

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO II

Figura 2.1 Promedio anual por estación y distribución geográfica del SO_2 en 2015. 26

Figura 2. 2 Promedio anual por estación y distribución geográfica del NO_2 en 2015. 27

CAPÍTULO III

Figura 3.1 Cadena montañosa de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. 34

Figura 3.2 Distribución climática de La Ciudad de México. 35

Figura 3.3 Distribución del suelo en la ZMCM. 37

Figura 3.4 Distribución por género de la población de la ZMCM. 38

CAPÍTULO IV

Figura 4.1 Distribución espacial de las estaciones de la REDDA. 42

Figura 4.2 Protocolo de muestro de depósito atmosférico húmedo y seco. 44

Figura 4.3 Muestreador de agua de lluvia, modelo ASP 78100. 45

Figura 4.4 Etiqueta de registro para muestras de depósito húmedo en la SCA-CCA-UNAM. 46

Figura 4.5 Cromatógrafo Líquido 850 Professional IC. 48

Figura 4.6 Estaciones de la Red de Meteorología. SIMAT 50

Figura 4.7 Intervalos y relación de la correlación de Spearman. 52

Figura 4.8 Gráfico boxplot realizado en OpenAir. 53

Figura 4.9 Gráfico de correlación realizado en OpenAir. 54

CAPÍTULO V

Figura 5.1 Gráficos resumen de WSP, HR, TMP y PP en los años de estudio 59

Figura 5.2 Rosas de viento anuales para los años estudiados. 60

Figura 5.3 Comportamiento de la temperatura por estaciones de muestreo, 2013-2016. 62

Figura 5.4 Comportamiento de la humedad relativa por estaciones de muestreo, 2013-2016... 63

Figura 5.5 Comportamiento de la velocidad del viento por estaciones de muestreo, 2013-2016
..... 64

Figura 5.6 Rosas de viento por estaciones de monitoreo meteorológico. 65

Figura 5.7 Comportamiento de la precipitación por estaciones de muestreo, 2013-2016 67

Figura 5.8 Relación de las muestras analizadas en el laboratorio de la SCA-CCA. 67

Figura 5.9 Distribución espacial del pH en la ZMCM para los años 2013,2014,2015 y 2016. 69

Figura 5.10 Distribución espacial y temporal de la conductividad eléctrica en la ZMCM. 71

Figura 5.11 Abundancia en $\mu\text{Eq/L}$ de los iones analizados. 73

Figura 5.12 Distribución espacial y temporal de SO_4^{2-} en $\mu\text{Eq/L}$ en la ZMCM. 74

Figura 5.13 Flujos medios anuales de SO_2 del volcán Popocatépetl. 75

<i>Figura 5.14 Distribución espacial y temporal del anión NO_3^- en $\mu Eq/L$ en la ZMCM.</i>	76
<i>Figura 5.15 Distribución espacial y temporal del ion NH_4^+ en $\mu Eq/L$ en la ZMCM.</i>	78
<i>Figura 5.16 Promedios anuales del depósito acumulado para cada ion analizado en kg/ha.</i>	79
<i>Figura 5.17 Distribución espacial y temporal del depósito de SO_4^{2-} en kg/ha en la ZMCM.</i>	81
<i>Figura 5.18. Distribución espacial y temporal del depósito de NO_3^- en kg/ha en la ZMCM.</i>	82
<i>Figura 5.19 Distribución espacial y temporal del depósito de NH_4^+ en kg/ha en la ZMCM.</i>	83
<i>Figura 5.20 Correlación de Spearman entre las variables meteorológicas y los iones de lluvia para la ZMCM 2013-2016.</i>	86
<i>Figura 5.21 Correlación de Spearman entre la precipitación y los iones H^+, NH_4^+, NO_3^- y SO_4^{2-} para la ZMCM 2013-2016.</i>	88
<i>Figura 5.22 Correlación de Spearman entre la temperatura y los iones H^+, NH_4^+, NO_3^- y SO_4^{2-} para la ZMCM 2013-2016.</i>	91
<i>Figura 5. 23 Correlación de Spearman entre la humedad relativa y los iones H^+, NH_4^+, NO_3^- y SO_4^{2-} para la ZMCM 2013-2016.</i>	93
<i>Figura 5.24 Correlación de Spearman entre la velocidad del viento y los iones H^+, NH_4^+, NO_3^- y SO_4^{2-} para la ZMCM 2013-2016.</i>	94
<i>Figura 5. 25 Relación de la dirección del viento con el pH de las muestras de lluvias analizadas en la estación CCA durante el período 2013-2016.</i>	96
<i>Figura 5.26 Corridas con el modelo HYSPLIT para los días con lluvia ácida en la estación del CCA</i>	98
<i>Figura 5.27 Mapas de flujo de 700 MB para los días 15 de julio de 2014 (A), 2 de septiembre de 2015 (B) y 8 de julio 2016 (C). Mapas de altura geopotencial en el nivel de 700 para los días 15 de julio de 2014 (D), 2 de septiembre de 2015 (E) y 8 de julio 2016 (F).</i>	100
<i>Figura 5.28 Corridas con el modelo HYSPLIT para los días con lluvia alcalina en la estación del CCA</i>	102
<i>Figura 5. 29 Mapas de flujo de 700 MB para los días 11 de julio de 2014 (A), 22 de junio de 2015 (B) y 24 de julio 2016 (C). Mapas de altura geopotencial en el nivel de 700 para los días 11 de julio de 2014 (D), 22 de junio de 2015 (E) y 24 de julio 2016 (F).</i>	103

ABREVIATURAS, ACRÓNIMOS Y SIGLAS

Ca ²⁺	Ion Calcio
CH ₄	Metano
Cl ⁻	Ion Cloruro
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
ENOS	El Niño-Oscilación del Sur
H ⁺	Ion Hidronio
H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico
HNO ₃	Ácido Nítrico
HR	Humedad Relativa
HYSPLIT	Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
K ⁺	Ion Potasio
kg/ha	Kilogramos por hectárea
Na ⁺	Ion Sodio
NADP	National Atmospheric Deposition Program
NH ₄ ⁺	Ion Amonio
NO _x	Óxidos de Nitrógeno
NO ₂	Dióxido de Nitrógeno
NO ₃ ⁻	Ion Nitrato
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
PP	Precipitación
REDDA	Red de Depósito Atmosférico
REDMET	Red de Meteorología y Radiación Solar
RUOA	Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos
SCA-CCA-UNAM	Sección de Contaminación Ambiental del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México
SIMAT	Sistema de Monitoreo Atmosférico
SEDEMA	Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México
SO ₂	Dióxido de Azufre
SO ₄ ²⁻	Ion Sulfato
SPSS	Statistical Package for the Social Sciences
TMP	Temperatura
µEq/L	Microequivalente por Litro
US-EPA	United States Environmental Protection Agency
WDR	Dirección del viento
WMO	World Meteorological Organization
WSP	Velocidad del viento
ZMCM	Zona Metropolitana de la Ciudad de México

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

La contaminación atmosférica constituye uno de los principales problemas ambientales para la población mundial debido al deterioro de la calidad del aire, lo cual ha generado el incremento de los efectos negativos sobre la salud humana y el ambiente. Las causas que originan la contaminación de la atmósfera son diversas, pero el mayor índice es provocado por las actividades industriales, comerciales, domésticas y agropecuarias desarrolladas por el hombre.

Existen dos procesos naturales primarios que participan en la remoción de los gases y partículas presentes en la atmósfera: El depósito atmosférico húmedo que es la transferencia de los contaminantes hacia la superficie terrestre por cualquier forma de precipitación (lluvia, nieve, niebla, rocío) y el depósito atmosférico seco que es la transferencia de los contaminantes hacia la superficie terrestre por la acción de la gravedad y del viento.

En el caso del depósito atmosférico húmedo, el cual se analizará en el presente trabajo, las precipitaciones desempeñan un papel preponderante en la remoción de los compuestos atmosféricos solubles. De esta forma, las mediciones de las especies químicas en la lluvia, constituyen un valioso instrumento para la gestión de la calidad del aire, al brindar información científica que ayuda a los tomadores de decisión a desarrollar planes y acciones dirigidos a la eliminación o a la reducción de emisiones de contaminantes que producen su acidificación (López, 2011).

Se considera lluvia ácida a toda precipitación cuyo $\text{pH} < 5.6$ (<http://nadp.sws.uiuc.edu>), esta definición considera que el agua presente en la atmósfera ya tiene cierta acidez debida a la formación natural del ácido carbónico. Este fenómeno se produce principalmente por las transformaciones químicas de los óxidos de nitrógeno (NO_x) y el dióxido de azufre (SO_2) (por emisiones naturales o antropogénicas) con el oxígeno y el vapor de agua en la atmósfera. Estas transformaciones dan lugar a ácidos que en condiciones meteorológicas favorables para la convección y precipitación son receptadas en la superficie mediante el depósito atmosférico húmedo.

La lluvia ácida no siempre ocurre sobre el lugar en que se emiten sus precursores, ya que en ocasiones, debido a la acción de las masas de aire que transportan los

contaminantes a larga distancia estas pueden ocurrir en territorios vecinos, este fenómeno le da un carácter transfronterizo, provocando una mayor atención internacional y que se requiera de estudios interdisciplinarios entre la meteorología, la química y otras ramas relacionadas con los efectos nocivos que se provocan en el entorno para su estudio.

La ZMCM presenta un elevado número de industrias, oficinas, almacenes, restaurantes, cafeterías, negocios que emiten diariamente estos gases precursores de lluvia ácida. Sumándole a estos los vehículos de servicio público y privado que, por las características de las vías, los regímenes de velocidad y el nivel de mantenimiento emiten al aire cantidades considerables de gases y partículas.

Esta situación trae como consecuencia la formación de una capa de aire con características contaminantes que, no solo está afectando la salud de quienes permanecen en la ZMCM, sino que puede estar causando deterioro en el patrimonio cultural propio de la ciudad.

Es importante anotar que el área de estudio se encuentra bajo unas condiciones climáticas muy particulares las cuales poseen, indudablemente, relación con la permanencia, difusión y depósito de los contaminantes que llegan a la atmósfera. Por esta razón se considera importante determinar las condiciones meteorológicas propias de la región, estudiando, específicamente, el comportamiento de parámetros meteorológicos como la temperatura, la humedad relativa, la precipitación, la velocidad y dirección del viento.

Por lo anterior se hace necesario estudiar la relación existente entre estos parámetros meteorológicos y el depósito atmosférico húmedo en la ZMCM mediante la información obtenida en la Red de Depósito Atmosférico (REDDA) y la Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET), las cuales se operan por el Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT). Dichas redes ayudan a la cuantificación de los niveles actuales de las especies químicas mayoritarias que componen el agua de lluvia, y determinan las condiciones meteorológicas que lo propicia, lo que contribuye a estimar el grado de contaminación de la atmósfera, la contribución relativa de las diferentes fuentes de

emisión de contaminantes atmosféricos y, en consecuencia, a elaborar medidas de prevención, minimización y control para mejorar la calidad del aire.

1.2 Objetivos

1.2.1 General

Evaluar la influencia de las condiciones meteorológicas en el depósito atmosférico húmedo en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México

1.2.2 Específicos

- ✚ Realizar una revisión bibliográfica sobre el depósito atmosférico húmedo y su relación con las condiciones meteorológicas, tanto a nivel nacional como internacional.
- ✚ Caracterizar la variación espacial y temporal de las variables meteorológicas en la zona de estudio a partir de la información disponible en la Red de Estaciones Meteorológicas.
- ✚ Determinar la distribución espacial y temporal de la composición química del depósito atmosférico húmedo (pH, conductividad, aniones y cationes) en 17 estaciones de muestreo de la ZMCM durante los años 2013-2016.
- ✚ Correlacionar las variables meteorológicas: Velocidad del viento, temperatura, humedad relativa y precipitación con las concentraciones de los iones en depósito atmosférico húmedo mediante el método de Spearman.
- ✚ Justificar las regiones de procedencia de los precursores de lluvia ácida que causan depósito atmosférico húmedo en la ZMCM mediante el análisis de los eventos de lluvia en la estación ubicada en el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM.
- ✚ Proponer medidas de prevención, minimización y control de los precursores de lluvia ácida, considerando la influencia de la meteorología.

CAPÍTULO II
MARCO TEÓRICO

2.1 Atmósfera terrestre

Se denomina atmósfera a la capa gaseosa que rodea a un planeta u otro cuerpo celeste y que determina en gran medida, sus características físicas, químicas y termodinámicas (<http://www.nws.noaa.gov/glossary/>). Dicha capa que rodea el planeta Tierra es conocida como Atmósfera Terrestre.

La atmósfera presenta varias clasificaciones: atendiendo principalmente a la disminución de la temperatura con la altitud y de acuerdo con la distribución de los compuestos químicos que presenta.

Las capas de la atmósfera en la altura, de acuerdo con la temperatura, están definidas por criterios diferentes de varios autores, aunque la mayoría concuerda en distinguirlas como:

- ✚ La troposfera es la capa más baja de la atmósfera y en donde se desarrollan todos los procesos meteorológicos y los mayores movimientos verticales. Su extensión abarca de 8 km a 18 km, dependiendo de la latitud y la estación del año, siendo su mayor extensión en el ecuador, en la época de verano y la menor extensión en la región polar de la Tierra durante la época de invierno. La troposfera tiene una disminución en la temperatura casi constante, la cual se reduce con respecto a la altura a un valor de $6.5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (Seinfeld y Pandis, 1997).
- ✚ La estratosfera es la segunda capa después de la troposfera y se extiende hasta unos 50 km aproximadamente. En esta capa la temperatura del aire comienza a estabilizarse y comienza a aumentar con la altitud, además, se caracteriza por la baja variación en su perfil térmico entre 15°C y 32°C y por la ausencia de corrientes convectivas de aire (Heinke y Henry, 1999). Por esta razón la difusión en esta capa es muy lenta, además de las reacciones fotoquímicas de producción del ozono a partir del oxígeno y la radiación ultravioleta proveniente del sol.
- ✚ La mesosfera se extiende por encima de los 50 km, contiene solo cerca del 0.1% de la masa total del aire. Se caracteriza por un mezclado vertical rápido. En esta región la temperatura decrece nuevamente con respecto a la altitud, hasta -100°C a los 85 km de su límite superior (Godish, 2004). Es la región más fría de la atmósfera terrestre.

✚ La termosfera se extiende sobre los 85 km y hasta los 1000 km. Es la capa con mayor altitud de la atmósfera, también conocida como ionosfera, a consecuencia de una región (de los 90 km a los 400 km de altitud), en que la ionización del aire contenido en ella es ocasionada por la acción de la radiación solar; las partículas resultantes como oxígeno y nitrógeno atómico se disponen en una serie de subcapas y son responsables de la reflexión de las ondas de radio y absorción de las radiaciones de baja longitud de onda. Como resultado de esta situación se presenta un incremento en la temperatura de forma continua hasta cerca de los 1200°C (Hinds, 1999).

Por otro lado, si se atiende a una clasificación atmosférica basada en el estado de mezcla y composición, la atmósfera queda dividida en dos regiones: a) la homosfera, donde las especies atmosféricas están bien mezcladas y las abundancias relativas de los constituyentes permanecen constantes con la altura y b) la heterosfera, donde la mezcla es inhibida por el gradiente de temperatura y los distintos constituyentes pueden separarse por la acción de la gravedad. El límite que separa estas dos regiones se sitúa en torno a 100 km y es conocido como turbopausa (Marín, 2003).

La homosfera es relativamente uniforme en composición, excepto para los componentes minoritarios, debido a una variedad de fenómenos de mezcla turbulenta. Sin embargo, por encima de 100 km, en la heterosfera, la difusión de los gases es más intensa que su mezcla por turbulencia, por lo que sus concentraciones varían con la altitud (Marín, 2003).

2.1.1 Composición química de la atmósfera

La atmósfera de la Tierra está compuesta principalmente por nitrógeno (78,1%), oxígeno (20,94%), argón (0,93%), vapor de agua (tiene una concentración variable de 1 a 4%, las que se encuentran principalmente en los primeros 5 kilómetros, las cuales se inyectan a la atmósfera gracias a los procesos de evaporación que se producen en las superficies terrestres) y una serie de gases traza (dióxido de carbono, neón, helio, metano, criptón, hidrógeno, óxido nitroso, xenón, ozono, amoníaco, yodo, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre, ácido nítrico, monóxido de carbono, monóxido de nitrógeno y partículas) que no sobrepasan el 1%. Esta composición se ha mantenido relativamente constante durante gran parte de la historia de la Tierra (Ramos et al., 1996).

La composición de las distintas capas de la atmósfera puede verse alterada por diferentes causas. Una de estas causas son las reacciones que tienen lugar entre los compuestos químicos presentes en ella. Principalmente estas reacciones se inician por vía fotoquímica e influyen a su vez en los perfiles de temperatura y en la concentración de las especies presentes en las diferentes capas.

Las especies químicas consideradas contaminantes se pueden generar en la troposfera “in situ” o emitidas desde la superficie terrestre. Una vez en la troposfera pueden seguir tres vías o procesos (Moreno, 2016):

- ✚ Reacciones fotoquímicas (entre las que se incluye la fotólisis) en la zona de emisión (química de la troposfera).
- ✚ Transporte a la estratosfera, donde pueden sufrir otra serie de procesos, dando lugar a los ciclos catalíticos de destrucción de ozono (química de la estratosfera).
- ✚ Después de un tiempo de residencia o permanencia en la troposfera, puede depositarse sobre la superficie terrestre, por depósito seco o húmedo.

En el caso de las especies radiactivas, aparece una vía extra, el decaimiento o la pérdida espontánea de su actividad radiactiva, pero eso no implica que desaparezca el contaminante, sólo sus efectos de contaminación radiactiva (Moreno, 2016).

2.2 Contaminación atmosférica

Se entiende por contaminación atmosférica la presencia en el aire de sustancias en una cantidad que alteren la calidad del mismo, de modo que implique riesgo, daño o molestias graves para las personas y demás seres vivos, bienes de cualquier naturaleza, que puedan atacar a distintos materiales, reducir la visibilidad o producir olores desagradables (Martínez et al., 2004).

El fenómeno de la contaminación atmosférica supone una secuencia de acontecimientos: la generación de contaminantes y su liberación desde una fuente de emisión; su transporte, transformación en la atmósfera y su eliminación; así como sus efectos sobre los seres humanos, los materiales y los ecosistemas.

En el caso de las fuentes de contaminación atmosférica éstas pueden ser de origen (<http://www.epa.gov/>):

- ✚ Natural. Como las erupciones volcánicas, el polen, el polvo originado por el viento y los incendios forestales, los terpenos procedentes de las plantas, la actividad microbiológica...
- ✚ Antropogénica. El ser humano acentúa las emisiones de contaminantes de origen natural y en mayor medida libera contaminantes debido a la actividad urbano-industrial.

Además, los contaminantes pueden agruparse en dos categorías (<http://www.epa.gov/>):

- ✚ Contaminantes primarios. Son las especies químicas emitidas directamente a la atmósfera por fuentes identificables. En este grupo se encuentran CO, CO₂, CH₄, NO, NO₂, SO₂, partículas.
- ✚ Contaminantes secundarios. Son las especies que se forman como consecuencia de los procesos químicos o fotoquímicos que sufren los contaminantes primarios en la atmósfera. Entre ellos están: el H₂SO₄ formado a partir de SO₂ y el HNO₃ formadas a partir del NO₂.

Dado que la respiración del aire contaminado puede tener graves efectos sobre la salud como el asma, la EPOC (Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica) o el aumento de los riesgos cardiovasculares (Gauderman et al., 2007; Hoffmann, 2007), la mayoría de los países han reforzado las leyes para controlar la calidad del aire en las últimas décadas. Además, como el aire contaminado se considera un problema regional, las conferencias internacionales han desarrollado recientemente diferentes formas de mejorar y asegurar la calidad del aire empleando perspectivas estratégicas globales (Curtis et al., 2006).

Pero a pesar de estos enormes esfuerzos científicos y legislativos para medir y mejorar los niveles de calidad del aire, muchas personas aún están expuestas al aire peligrosamente contaminado a diario (Groneberg y Witt, 2005; Cohen et al., 2005) por lo que cada acción que se lleve a cabo por pequeña que fuese, cuenta y ayuda a resolver esta problemática.

2.3 Depósito atmosférico

El depósito atmosférico se define como la masa total de contaminantes transferida desde la atmósfera a la superficie en un área establecida y durante un período de tiempo determinado (Puente et al., 2010).

La remoción de un contaminante de la atmósfera puede ocurrir por precipitación (depósito húmedo) o por depósito seco (Duce et al., 1983); el depósito húmedo tiene lugar en forma intermitente, mientras que el depósito seco es continuo.

En el depósito húmedo, los gases y partículas se transportan hacia la superficie por gotas de agua, donde colisionan, se absorben o experimentan reacciones químicas en fase acuosa. Según García, 2007 los principales procesos de remoción húmeda de aerosoles son:

- ✚ Remoción por nucleación: Los contaminantes se remueven por disolución o absorción en gotas de nube, donde son transformados por reacciones químicas en fase acuosa. El contaminante absorbido puede reaccionar dentro de la nube para formar productos secundarios que se pueden remover por la precipitación. Este mecanismo se conoce como rain-out y es responsable de la remoción entre el 75% y el 90% de los contaminantes que se encuentran en la atmósfera.
- ✚ Remoción por impacto: Remoción por gotas de precipitación que colectan los compuestos ácidos (debajo de la base de la nube) por impacto (inercial o difusión browniana). Este mecanismo se conoce como wash-out.

El depósito seco se define como la forma en la que los contaminantes se remueven a la superficie terrestre sin la ocurrencia de forma alguna de precipitación. Los diferentes mecanismos por los que se depositan pueden ser cuando las partículas caen por los efectos de la gravedad (sedimentación gravitacional), cuando las partículas finas siguen un perfil de flujo y se mueven y/o colisionan con un obstáculo (interceptación), cuando se encuentran con un obstáculo de mayor tamaño al que no pueden bordear y quedan atrapados en él (impacto), también por el movimiento caótico de las partículas al colisionar con las moléculas de gases y chocan con la superficie (movimiento de difusión browniano), así como por la turbulencia debido a los remolinos de aire, los que tienden a

desestabilizar el movimiento de la partícula y precipitan a tierra (Seinfeld y Pandis, 2006). Duce y Hoffman en 1975 concluyeron que la remoción de partículas por lluvia es aproximadamente dos veces más grande que el depósito seco.

Por último, se encuentra el depósito global el cual se define así porque en la etapa de muestreo se alternan períodos secos y húmedos, por tanto, se recoge tanta agua de lluvia como partículas sedimentables.

2.4 Lluvia ácida

El Programa Nacional de Depósito Atmosférico (NADP) define a la lluvia ácida como cualquier forma de precipitación (lluvia, nieve, granizo o niebla) cuyo valor de pH sea inferior a 5.6, esta definición considera que el agua presente en la atmósfera ya tiene cierta acidez (<http://nadp.sws.uiuc.edu>).

El agua pura tiene un valor de pH = 7 (neutro). La lluvia en una atmósfera libre de contaminantes tiene un pH de 5.6, debido a la presencia de CO₂ atmosférico, que se transforma en ácido carbónico (H₂CO₃). Por esta razón, durante muchos años este valor de pH se ha utilizado para distinguir las lluvias ácidas de las no ácidas (Galloway et al., 1984; Lojze-Pilot et al., 1986; Seinfeld y Pandis, 2006)

El CO₂ reacciona con el agua para formar H₂CO₃ (Ec. 2.1). A continuación, el ácido carbónico se disocia para formar el ion H⁺ y el ion bicarbonato (HCO₃²⁻) (Ec. 2.2), este último, a su vez, puede liberar un ion H⁺ y el ion carbonato (CO₃²⁻) (Ec.2.3) (Seinfeld y Pandis, 2006). La capacidad de H₂CO₃ para liberar H⁺ es lo que clasifica esta molécula como un ácido, bajando así el pH del agua.



Las flechas que aparecen en esta ecuación y que van hacia un sentido y hacia el otro indican que las reacciones son reversibles y que se presenta un equilibrio entre los reactivos y el producto, es decir, están coexistiendo en un mismo momento. Las constantes de equilibrio para estas reacciones son (Ecs. 2.4 y 2.5):

$$K_{a1} = \frac{[\text{HCO}_3^-][\text{H}^+]}{[\text{CO}_2(\text{ac})]} = 4.47 \times 10^{-7} \quad \text{Ec. (2.4)}$$

$$K_{a2} = \frac{[\text{CO}_3^{2-}][\text{H}^+]}{[\text{HCO}_3^-]} = 4.68 \times 10^{-11} \quad \text{Ec. (2.5)}$$

Suponiendo que todo el CO_2 disuelto en agua de lluvia pasa a formar ácido carbónico y se disocian los iones hidronio; además de que no influyen otros gases presentes en la atmósfera, se puede igualar la concentración de iones hidronio a la suma de la concentración de iones carbonato, bicarbonato e hidroxilo (Masters, 1998):

$$[\text{H}^+] = [\text{OH}^-] + [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] \quad \text{Ec. (2.6)}$$

La concentración de H_2CO_3 , se obtiene en función de la concentración de CO_2 , el cual se puede estimar mediante La ley de Henry; esta ley establece que la solubilidad de un gas en agua está dada por una constante y la presión parcial del gas en cuestión (Alarcón, 2012):

$$[\text{CO}_2]_{\text{disuelto}} = K_{\text{HP}} \quad \text{Ec. (2.7)}$$

El valor de la constante de Henry para el CO_2 a 25°C es de $0.033 \text{ mol/L}\cdot\text{atm}$ y la presión parcial de este gas es de 0.00036 atm^{-1} (Masters, 1998).

Despejando el ion bicarbonato (HCO_3^-) y el ion carbonato (CO_3^{2-}) de las Ec. (2.4) y Ec. (2.5), respectivamente, e incluyendo la concentración del ion hidroxilo de la disociación del agua, se tiene que (Fuentes, 2015):

$$[\text{HCO}_3^-] = (K_{a1}[\text{CO}_2(\text{ac})]) / [\text{H}^+] \quad \text{Ec. (2.8)}$$

$$[\text{CO}_3^{2-}] = (K_{a2} [\text{HCO}_3^-]) / [\text{H}^+] \quad \text{Ec. (2.9)}$$

$$[\text{OH}^-] = K_{\text{H}_2\text{O}} / [\text{H}^+] \quad K_{\text{H}_2\text{O}} = 10^{-14} \quad \text{Ec. (2.10)}$$

Sustituyendo estas tres últimas expresiones en la Ec. (2.6) y reagrupando términos se obtiene la siguiente ecuación (Fuentes, 2015):

$$[\text{H}^+]^3 - (K_{\text{H}_2\text{O}} + p_{\text{CO}_2} K_{a1} K_{\text{H}})[\text{H}^+] - 2p_{\text{CO}_2} K_{a1} K_{a2} K_{\text{H}} = 0 \quad \text{Ec. (2.6)}$$

Suponiendo que la concentración de CO_2 es de 390 ppm en la atmósfera, el valor de pH será aproximadamente 5.6, lo anterior resulta de resolver las ecuaciones anteriores en

términos de concentración y de las constantes de equilibrio de las reacciones involucradas (Masters, 1998; Domenéch, 2006; Alarcón, 2012).

De acuerdo a los criterios de la US-EPA, cuando el pH de la lluvia es menor de 5.6 significa que el contenido de iones H^+ incrementa, lo que ocurre como consecuencia de reacciones de formación de otros ácidos diferentes al H_2CO_3 . Cuando estas condiciones prevalecen se está en presencia de una lluvia con características ácidas.

Para la evaluación de la acidez de la lluvia es necesaria la determinación analítica de los principales elementos químicos que la componen y no sólo estudiar la componente acidificante, sino también los elementos responsables de la neutralización. En este sentido, desempeña un papel primordial la cantidad de materia alcalina presente actuando como agente neutralizador, especialmente los iones Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , y NH_4^+ (Campos et al., 2007; Huang, et al., 2008, Sakihama et al., 2008, López, 2011).

2.4.1 Precursores de lluvia ácida

Históricamente, los principales ácidos que contribuyen a la acidificación de la lluvia son el ácido sulfúrico (H_2SO_4) y el ácido nítrico (HNO_3), formados a partir de la oxidación en el aire del dióxido de azufre (SO_2) y los óxidos de nitrógeno (NO_x), respectivamente.

2.4.1.1 Dióxido de Azufre en la Ciudad de México

El dióxido de azufre (SO_2) es un gas incoloro y de olor irritante, que se forma durante la combustión del azufre o compuestos que lo contienen, como los combustibles fósiles, y se produce de manera natural en las emisiones volcánicas y en el humo de los incendios forestales, sin embargo, la contribución de fuentes naturales a la contaminación del aire de la Ciudad de México es mínima, mientras que, de acuerdo con el inventario de emisiones, la industria aporta alrededor del 85% del contaminante (SEDEMA, 2016).

En altas concentraciones este contaminante reacciona con la humedad de las mucosas conjuntival y respiratoria ocasionando irritación e inflamación aguda o crónica y puede tener un efecto sinérgico en combinación con las partículas en suspensión (<http://www.epa.gov/>). La vida media en la atmósfera del SO_2 llega a ser de 50 a 120 horas (Seinfeld, 1986).

Aunque la principal fuente de SO₂ es la industria, los registros de las estaciones ubicadas dentro de las zonas industriales y los inventarios de emisiones explican que en los altos niveles del contaminante en la ZMCM también influye el transporte del aire contaminante emitido desde la región industrial de Tula-Tepeji, dónde, las mayores concentraciones ocurren en aquellos días en donde el viento sopla desde el noroeste con dirección a la Ciudad de México (SEDEMA, 2017).

A continuación en la Figura 2.1 se muestra la distribución por estación del SO₂ para el año 2015 en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

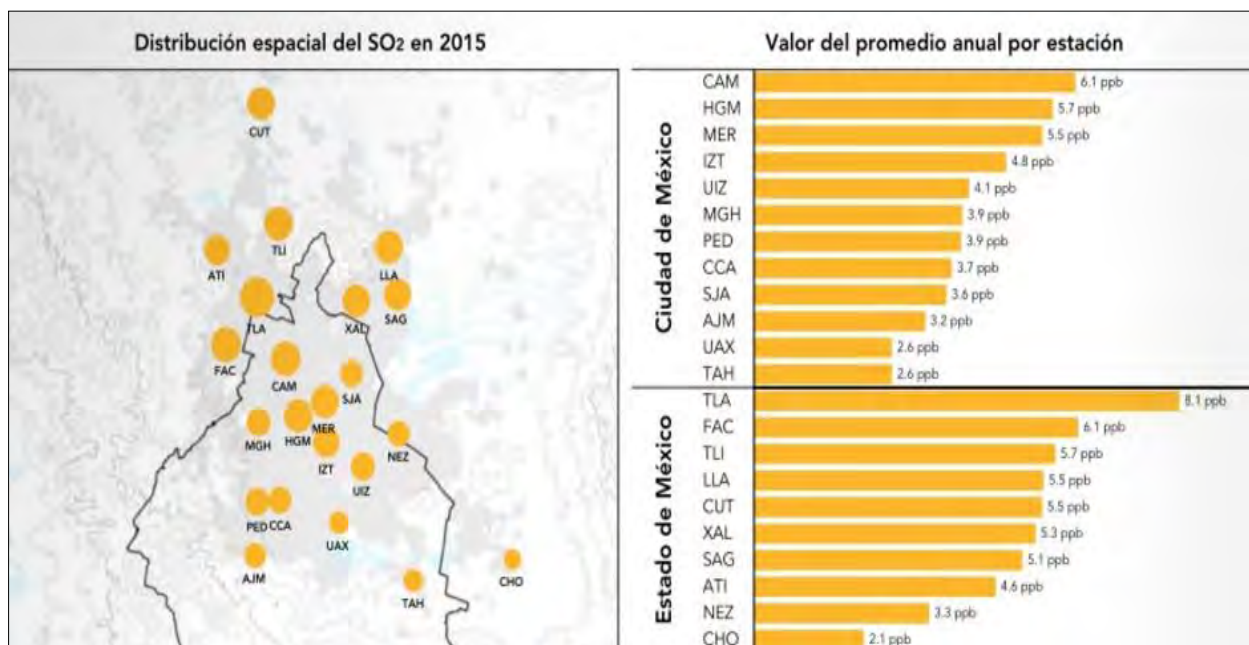


Figura 2.1 Promedio anual por estación y distribución geográfica del SO₂ en 2015.

(Fuente: Calidad del aire en la Ciudad de México. Informe 2015. SEDEMA)

2.4.1.2 Óxidos de Nitrógeno en la Ciudad de México

Los óxidos de nitrógeno (NO_x) comprenden un grupo de compuestos que contienen oxígeno y nitrógeno, sin embargo, desde el punto de vista de la salud humana solo el NO₂ se considera como contaminante criterio. Es un gas de color rojizo, olor irritante, que reacciona fácilmente con el agua y se produce durante los procesos de combustión que ocurren en presencia del oxígeno y el nitrógeno del aire, así como de la oxidación del óxido nítrico (NO). El NO₂ es precursor de ozono y puede provocar efectos en la salud

que van desde irritación en las vías respiratorias hasta daño en la membrana celular del tejido pulmonar. En concentraciones muy altas puede provocar bronquitis y pulmonía (<http://www.epa.gov/>).

Debido a que gran parte de los NO_x (78%) proviene de los vehículos automotores, se observa que la distribución espacial de éstos se lleva a cabo siguiendo un patrón muy parecido a las principales vialidades, por lo que las mayores emisiones se concentran en las delegaciones centrales de la Ciudad de México y algunos municipios de alta intensidad vehicular (SEDEMA, 2016) (Figura 2.2).

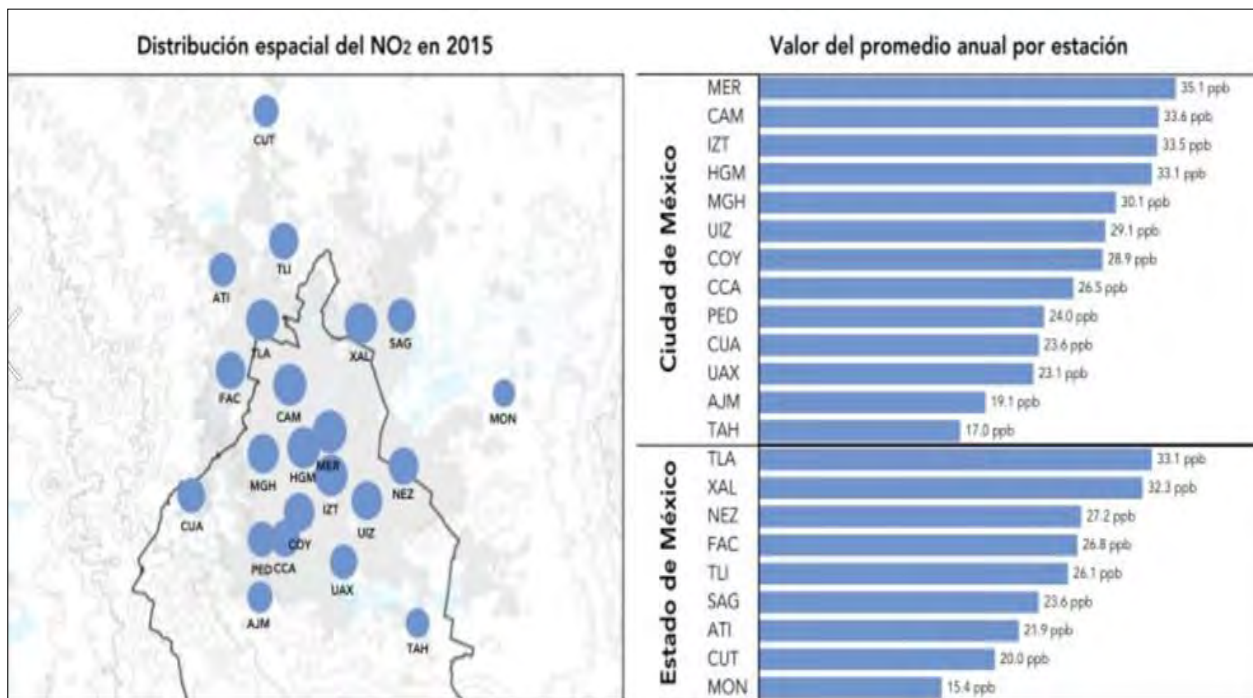


Figura 2.2 Promedio anual por estación y distribución geográfica del NO₂ en 2015.

(Fuente: Calidad del aire en la Ciudad de México. Informe 2015. SEDEMA)

2.4.2 Proceso de formación de la lluvia ácida

Los precursores de la lluvia ácida, una vez formados, se disocian por la acción de la radiación electromagnética proveniente del sol y generan iones NO₃⁻ y SO₄²⁻ que, al interactuar con el vapor de agua presente en la atmósfera, forman HNO₃ y H₂SO₄, dos ácidos fuertes debido a su alta disociación en disoluciones acuosas. La dilución de estos compuestos altera la composición normal de las gotas de agua en la atmósfera que al

precipitarse en forma de lluvia, nieve, granizo, niebla o neblina producen la acidificación de las mismas (Seinfeld, 1986).

2.4.3 Efectos ambientales de la lluvia ácida

La lluvia ácida es un problema de contaminación atmosférica que ha tenido una gran repercusión a nivel global, su estudio ha demostrado variedad de efectos nocivos tanto en ecosistemas como en obras y monumentos.

Las precipitaciones ácidas pueden aumentar la acidez del agua de ríos y lagos lo que estimula que se incremente la concentración de metales tóxicos como aluminio, plomo, mercurio, cadmio, lo cual provoca la disminución de la población de peces, crustáceos, moluscos, algas y la desaparición del fitoplancton, el que ocasiona, con el tiempo, la imposibilidad de sobrevivencia para el resto de la fauna, por falta de alimento y vuelve a los lagos transparentes (Seinfeld y Pandis, 2006; López, 2011).

El depósito ácido en las plantas afecta el crecimiento, el metabolismo, la productividad y la actividad fotosintética. En las hojas de las plantas se producen lesiones cloróticas y necróticas (González y Bergowist, 1986). Además, los efectos de lixiviación de cationes (Ca^{2+} y Mg^{2+}) en los suelos provoca un desbalance de nutrientes en las plantas lo que disminuye su capacidad de responder a condiciones de estrés biótico o abiótico (Butler et al., 2003; López, 2011). La vegetación expuesta directamente a la lluvia ácida no sólo sufre las consecuencias del deterioro del suelo, sino también un daño directo que puede llegar a ocasionar incluso la muerte de muchas especies

De igual manera, contribuye a la acidificación de los suelos, lo cual provoca cambios en la composición de los mismos, propiciando la lixiviación de nutrientes importantes para las plantas y movilizándolo metales tóxicos, como el cadmio, níquel, manganeso, plomo, aluminio y mercurio, que de esta forma se introducen en las corrientes de agua (Dai et al., 1998; Hruška et al., 2002; Wang et al., 2007). Al disminuir la cantidad de nutrientes en el suelo, el crecimiento de plantas e incluso de árboles grandes se inhibe, lo que ocasiona que ciertas áreas con vegetación abundante se vuelvan estériles.

Otro de los efectos de las precipitaciones ácidas son los daños causados a muchos monumentos y construcciones de mármol y piedra caliza que constituyen patrimonio de la humanidad, lo cual provoca el desgaste y la fragilidad del material por el que están

construido, principalmente carbonato de calcio (CaCO_3) (Camuffo, 1992). La piedra caliza que se ha utilizado en la construcción de monumentos mayas y totonacas sufre un desgaste producido por el pH ácido de la lluvia, que reacciona con el CaCO_3 disolviéndolo; esto genera un desgaste superficial anual de 4.4 y 4.57 $\mu\text{m/año}$ para la zona maya y totonaca, respectivamente (Bravo et al, 2003; Bravo et al, 2004). Igualmente, las lluvias ácidas están destruyendo otros de los tesoros importantes de la humanidad, entre ellos están el Partenón de Atenas, la Columna de Trajano, y el coliseo de Roma, el Taj Majal en la India y los monumentos de mármol en Venecia (Gauri, 1982).

2.5 Relación entre las variables meteorológicas y el depósito atmosférico húmedo

La constante oscilación de las concentraciones de la contaminación urbana y regional son el resultado del desequilibrio entre los índices de emisiones de contaminantes naturales y antropogénicos y varios procesos que incluyen: su difusión, reacciones químicas de transformación, absorción por el suelo, absorción por la vegetación y limpieza por precipitaciones (Galindo, 1989; Martínez y Romieu, 1997).

Durante los procesos anteriormente señalados, el transporte de contaminantes a escala sinóptica y las condiciones meteorológicas como la precipitación, la temperatura, la humedad, la dirección y velocidad del viento, influyen en la composición química de la lluvia (Tang et al., 2005; Baéz et al., 2006), por lo que su estudio es de gran importancia.

En las precipitaciones menos abundantes, las gotas tienden a ser más pequeñas que en las lluvias más intensas, las cuales tienen más tiempo de residencia en la atmósfera y por lo tanto podrían incorporar más partículas de aerosoles y gases (Lee et al., 2000; Seinfeld y Pandis, 2006), mientras que una gran cantidad de lluvia podría diluir la concentración de los iones (Tang et al., 2005; López, 2011).

La influencia del viento sobre la lluvia ácida es también muy significativa pues éste puede producir el arrastre de contaminantes desde regiones remotas (Munn, 1969; Munn y Bolin, 1971; López, 1978) y a la vez puede provocar la dispersión de los compuestos originados en la propia localidad tanto de origen natural como antropogénica (Berliand, 1979). Conjuntamente, la velocidad del viento es un factor clave en la contaminación del aire pues influye en la concentración total de partículas en la atmósfera, mientras menor

sea esta variable meteorológica, mayor será la acumulación de los contaminantes debido a su poca dispersión (Orza et al. 2011).

El aumento de la temperatura incrementa las reacciones en las fases gaseosa y acuosa, con lo cual más contaminantes en estado gaseoso pasan a iones, potenciando las concentraciones en las precipitaciones (Buda y DeWalle, 2002). Como la temperatura suele descender con la altitud hasta el nivel superior de la troposfera a razón de aproximadamente $6.5^{\circ}\text{C}/\text{km}$, el aumento de la temperatura con la altitud se conoce como inversión del perfil de temperatura normal. Las inversiones térmicas actúan como tapaderas que frenan los movimientos ascendentes de la atmósfera, inhibe el transporte vertical y aumenta las concentraciones de los contaminantes a niveles bajos (Ren et al., 2004).

2.6 Modelación numérica de trayectorias de retroceso

Como la atmósfera es un sistema extremadamente complejo, requiere de modelos numéricos para simular una gran variedad de fenómenos atmosféricos que comprenden desde la química atmosférica global hasta la dispersión de contaminantes locales.

Un modelo numérico es un algoritmo matemático basado en ecuaciones físicas que intenta describir fenómenos que suceden en la naturaleza, el cual es traducido a un lenguaje de programación. Las discrepancias entre los diferentes tipos de modelos y específicamente los de calidad del aire residen principalmente en el número de procesos atmosféricos considerados, el nivel de profundidad con que son tratados, y los métodos utilizados para resolver las ecuaciones que los describen.

Entre los modelos numéricos utilizados en la simulación de la calidad del aire se encuentran los que intentan describir los procesos atmosféricos de transporte de contaminantes (Wang et al., 2010), su dispersión (Jain et al., 2007), los procesos de depósito seco y húmedo (Hernández et al., 2012), la concentración y transformación química de los contaminantes (Dasgupta et al., 2007), interpolar concentraciones entre puntos de monitoreo (Hu et al., 2010), apoyo al diseñar redes de monitoreo de la calidad del aire (Calori et al., 2006) y los que definen el origen de los contaminantes y de las masas de aire (Karaca y Camci, 2010) .

Los modelos numéricos de simulación de la calidad del aire pueden clasificarse en cuanto a diferentes parámetros, entre ellos se encuentran los métodos de cálculo, el alcance espacial de los fenómenos que simulan, su resolución temporal, así como el uso al que se destinan (Collazo, 2015; Cala, 2015).

En cuanto al método de cálculo se encuentran los modelos eulerianos (sistema fijo de coordenadas), lagrangianos (se basan en el estudio de fluidos, analiza el comportamiento de los compuestos químicos desde un sistema de referencia que acompaña el movimiento del fluido), y gaussianos (se describe el transporte y mezcla de los contaminantes, asumiendo que las emisiones presentan, una distribución normal con una concentración máxima en el centro de la pluma) (Cala, 2015).

Según su resolución temporal, pueden clasificarse en climatológicos, de mediano plazo, episódicos y de tiempo real. De acuerdo a su enfoque en la meteorología ambiental se usan en análisis de dispersión, fotoquímicos y de receptores (Cala, 2015).

2.6.1 HYSPLIT

Las trayectorias de retroceso dadas por un modelo numérico permiten conocer el recorrido de una masa de aire durante un intervalo de tiempo anterior hasta su llegada a un punto determinado. Su representación permite un mejor conocimiento sobre las características generales del conjunto de las masas de aire que afectan a un área, tales como su origen, tipo de recorrido o altura de circulación (Miller, 1981).

En la actualidad existen diferentes modelos meteorológicos que permiten el cálculo de trayectorias de retroceso, pudiendo mencionarse los modelos HYSPLIT (Draxler y Hess, 1998; Draxler et al., 2009) y FLEXPART (Stohl et al., 2005).

El cálculo de las trayectorias de masas de aire puede obtenerse de forma progresiva y de forma regresiva. Cuando se emplea la trayectoria progresiva permite estudiar la dispersión de los contaminantes en un área geográfica, mientras que las regresivas ayudan a conocer el origen y la fuente de los contaminantes (Xia et al., 2010). Para ambos procedimientos se requiere de una base de datos meteorológicos que permita guiar la trayectoria de la parcela, de tal modo que su trayectoria resulta solamente de la integración del vector de posición en el tiempo y el espacio. Sin embargo, cuando el viento

varía horizontal y verticalmente, una sola trayectoria no puede describir la evolución de una nube de contaminantes. En estas circunstancias, se necesita dividir la parcela en múltiples parcelas para describir en forma adecuada la dispersión. Una descripción exhaustiva del modelo se puede encontrar en Draxler y Hess (1998).

CAPÍTULO III
ÁREA DE ESTUDIO

3.1 Localización del área de estudio

La ZMCM, se localiza en la región central de la República Mexicana, a una altura promedio de 2,240 msnm. Su ubicación geográfica se encuentra dentro de las coordenadas geográficas 19.665°N y 99.083°O que corresponde a Villa de las Flores y 19.255°N y 98.999°O para Tláhuac y en los extremos este y oeste, 19.474°N y 98.896°O para Chapingo y 19.373°N y 99.282°O para Cuajimalpa, respectivamente. La misma está conformada por 16 delegaciones de la Ciudad de México y 28 municipios del Estado de México (<http://www.inegi.org.mx>).

La ZMCM se encuentra rodeada por una cadena montañosa formada por las sierras del Ajusco, Chichinautzin, Nevada, Las Cruces, Guadalupe y Santa Catarina, las cuales, representan un obstáculo para una adecuada dispersión de los contaminantes, propiciando su estancamiento. Entre los picos más altos de esta cadena montañosa se encuentran el Popocatepétl y el Iztaccíhuatl, localizados al sureste, con una altitud de 5,465 y 5,230 msnm, respectivamente (Ezcurra y Mazari, 1996) (Figura. 3.1).



Figura 3.1 Cadena montañosa de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

(Fuente: SEDEMA, 2004. Modificado por Moreno, 2017)

3.2 Clima y variables meteorológicas

La ZMCM se encuentra dentro de la zona tropical, debido a esto, su clima es tropical, aunque es modificado por la altitud y el relieve. En la Figura 3.2, se muestra que 57% del área de la zona está influenciada por el clima templado subhúmedo con lluvias en verano, el 33% clima semifrío y el 10% clima semiárido (Jáuregui, 2000).



Figura 3.2 Distribución climática de La Ciudad de México.

(Fuente: <http://www.inegi.org.mx>).

Además, su ubicación geográfica 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 una 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 (SEDEMA, 2006).

En la cuenca donde se ubica la ZMCM, las estaciones se mantienen sensiblemente invariable en el tiempo siendo básicamente de tipo monzónico, es decir, con una temporada de lluvias bien identificada de mayo a octubre y una seca de noviembre a abril (Jáuregui, 2000). Aproximadamente el 90% de las precipitaciones ocurren durante el verano debido a que se ve afectada por la entrada de aire cálido y húmedo procedente

del Océano Pacífico, del Golfo de México y del Mar Caribe, los cuales favorecen el movimiento ascendente del aire e inhiben la formación de inversiones térmicas, el aumento de la humedad debido al patrón de viento propio de la temporada (Los Alisios: vientos que soplan entre los trópicos y que parten de zonas subtropicales de alta presión con rumbo a regiones ecuatoriales de baja presión) y la constante presencia de perturbaciones atmosféricas conocidas como ondas tropicales que propician grandes cantidades de precipitación sobre los lugares por los cuales se desplazan. Mientras que sólo un 10% contribuye al total en la época invernal debido a las incursiones de masas de aire frío y seco, impulsadas por sistemas anticiclónicos que provocan descensos de temperatura, así como estratificación de las capas troposféricas, induciendo la formación de inversiones térmicas en superficie o en capas atmosféricas muy bajas, además en esta época, 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 (SEDEMA, 2006).

La circulación del viento, en nuestra área de estudio, muestra patrones estacionales y diurnos, con la presencia de vientos locales que experimentan el fenómeno valle-montaña, es decir, ejercen su influencia de la montaña al valle durante la noche y en sentido inverso durante el día. Esta circulación local desaparece cuando se da paso a los sistemas de mayor escala que barren la ciudad, predominantemente provenientes del norte en invierno (por influencia de los vientos del oeste) y del noreste en verano (por el arribo de los vientos Alisios), en las horas vespertinas (Jáuregui y Luyando, 1999)

3.3 Suelo y vegetación

Según la Guía para la interpretación de cartografía: uso del suelo y vegetación: escala 1:250,000: serie V del INEGI 2013, los principales usos de suelo en la ZMCM son: asentamientos, forestal (bosques) y agrícola; siendo en estos dos últimos, donde se generan las principales emisiones biogénicas (Figura 3.3).

Tan sólo la Ciudad de México cuenta con una superficie de 149,000 ha, en la cual el suelo urbano está ocupado con 61,458 ha (el 41%) y el suelo de conservación es de 87,310 ha (59%). De sus 16 delegaciones, siete se encuentran con suelo urbano: Azcapotzalco,

Benito Juárez, Coyoacán, Cuauhtémoc, Iztacalco, Miguel Hidalgo y Venustiano Carranza y las nueve delegaciones restantes poseen suelo de conservación siendo: Álvaro Obregón, Cuajimalpa, Gustavo A. Madero, Iztapalapa, Magdalena Contreras, Milpa Alta, Tlalpan, Tláhuac y Xochimilco. Estos suelos de conservación sirven para la captación e infiltración de agua, la regulación del clima y el mejoramiento de la calidad del aire (<http://www.inegi.org.mx>).

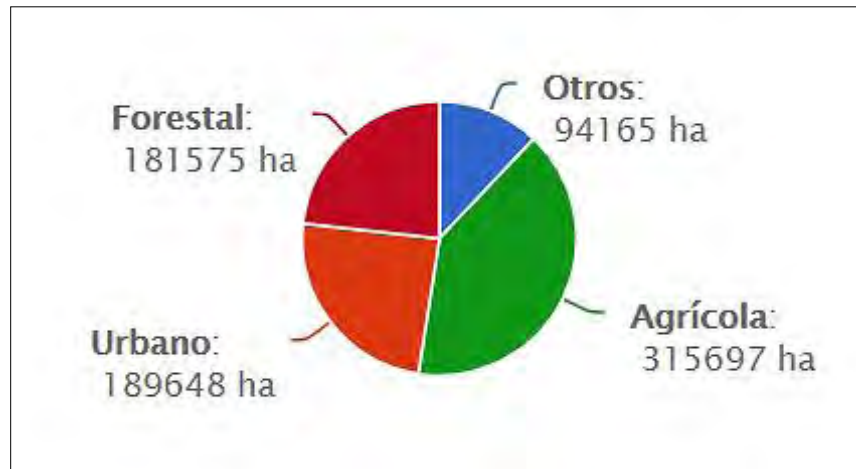


Figura 3.3 Distribución del suelo en la ZMCM.

(Fuente: <http://www.aire.cdmx.gob.mx>).

En cuanto a la vegetación en el sur, de nuestra área de estudio, se puede encontrar que predomina el bosque de pino, parte de pastizales, y una pequeña área de bosque de oyamel. En la parte oeste se tiene bosque de pino, selva baja, bosque de oyamel y un área de agricultura de temporal. El pastizal, se encuentra distribuido a lo largo de la parte sur de la zona, pero también se puede observar en la parte norte, en el este y oeste (<http://www.inegi.org.mx>).

3.4 Isla de calor

La Ciudad de México ha tenido un crecimiento en extensión y en población, lo que ha contribuido a la formación de fenómenos como el de la isla de calor, la cual, debido al tamaño en extensión de la superficie urbana, su estructura difusa y la cantidad de población que la reside, se ha generado en versiones de mayor intensidad. Esta máxima intensidad se ha incrementado con el crecimiento de la ciudad, llegando incluso, en casos

puntuales, a diferencias urbano-rurales de 10°C (Ballinas, 2011). Se define como intensidad máxima de la isla de calor a la diferencia de temperatura, entre la zona más cálida dentro de la ciudad y la que se encuentra en la zona rural de forma simultánea (Ballinas, 2011).

La isla de calor urbana afecta directamente la carga de calor humana y las personas pueden experimentar un fuerte no confort térmico (estrés térmico, índices de confort bioclimático) que afecta notablemente su productividad principalmente en el ciclo primavera-verano.

Por lo tanto, la isla de calor, es el resultado atmosférico, a escala local, de la extensión de un área urbanizada y de la población que contiene, bajo ciertas condiciones meteorológicas que facilitan esta formación. Su intensidad será mayor cuanto mayor sea el área urbana.

3.5 Aspectos socio-económicos

El crecimiento poblacional de la ZMCM está vinculado al desarrollo económico del país, el cual ha incidido en los patrones de distribución de asentamientos humanos.

El último censo de población y vivienda efectuado en el año 2015, arrojó que la ZMCM tiene alrededor de 21 056 210 de habitantes, donde en La Ciudad de México se encuentran 8 918 653 habitantes (<http://www.inegi.org.mx>). En cuanto a la distribución de género en la Figura 3.4 se ve muy bien explicada.

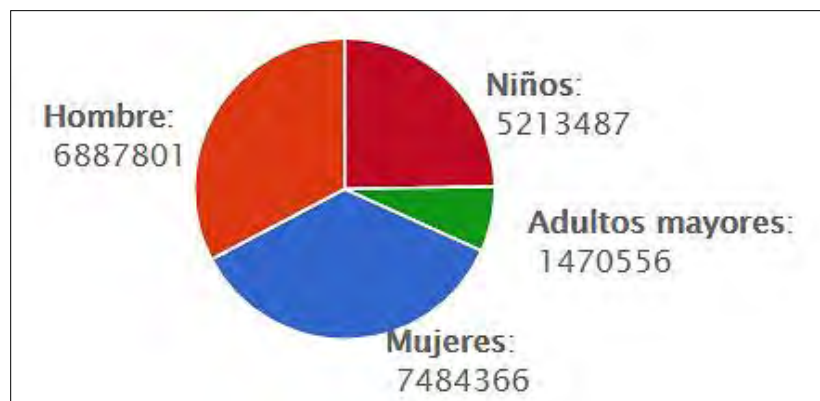


Figura 3.4 Distribución por género de la población de la ZMCM.

(Fuente: <http://www.aire.cdmx.gob.mx>)

De acuerdo al Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE) del INEGI, para el año 2014, en la ZMCM se encontraban registrados 70 000 establecimientos industriales (locales y federales), poco más de 32,000 se ubican en la Ciudad de México y los restantes 38 000 en los 59 municipios conurbados del Estado de México. Debido al incremento de las microindustrias, como resultado del fomento al autoempleo (Pradilla y Márquez, 2004), de estos 70 000 establecimientos, el 91% son microindustrias (más de 64 000), las cuales cuentan con menos de 10 empleados, y tan sólo el 9% corresponde a industrias medianas y grandes. En cuanto a la cuantía de vehículos, para este año, se tenían enumerados 5.3 millones (SEDEMA, 2015)

Aun cuando la mayor parte de los contaminantes del aire provienen de los vehículos de combustión interna y de las industrias, es importante mencionar que las actividades en viviendas y edificios, como lo es la limpieza y la cocción de alimentos, también contribuyen a la contaminación (SEDEMA, 2015).

CAPÍTULO IV
MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Muestreo

4.1.1 Red de muestreo de Depósito Atmosférico

Este trabajo se realizó con la coordinación conjunta del SIMAT, que se encarga de la colección y cadena de custodia de las muestras de depósito atmosférico húmedo en 16 estaciones a través de la REDDA y la SCA-CCA-UNAM, el cual se encarga del análisis fisicoquímico de las muestras de depósito atmosférico húmedo. Ambas instituciones han mantenido un constante muestreo y análisis del depósito atmosférico húmedo en la ZMCM desde el año 2003 a la fecha. Para este estudio se utilizaron los datos de los años 2013-2016.

La REDDA cuenta con 16 estaciones de monitoreo, 12 están localizadas en la Ciudad de México y 4 en el Estado de México, además cuentan con ciertos criterios técnicos para su ubicación como son la densidad de población, distribución de fuentes de emisión y topografía. En la Figura 4.1 y Tabla 4.1 se muestra la distribución espacial de la REDDA y los nombres de las estaciones.

La colecta en cada estación se realiza semanalmente y durante el período lluvioso, que abarca desde mayo a octubre. Además, en este trabajo se utilizaron los datos muestreados en la estación ubicada en el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) la cual se opera totalmente por la SCA-CCA-UNAM y donde se realiza el muestreo de depósito atmosférico húmedo semanal y diariamente todo el año.



Figura 4.1 Distribución espacial de las estaciones de la REDDA.

(Fuente: Sánchez Ramírez, 2013)

Zona	Delegación o Municipio	Estación	Clave
Noroeste (NO)	Miguel Hidalgo	IBM Legaria	IBM
	Gustavo A. Madero	Laboratorio de Análisis Ambiental	LAA
	Tlalnepantla	Tlalnepantla	TLA
Noreste (NE)	Texcoco	Montecillo	MON
	Nezahualcóyotl	Nezahualcóyotl	NEZ
	Gustavo A. Madero	Cerro del Tepeyac	TEC
	Ecatepec de Morelos	Xalostoc	XAL
Centro (C)	Benito Juárez	Museo de la Ciudad de México	MCM
Suroeste (SO)	Tlalpan	Ajusco	AJU
	Tlalpan	Diconsa	DIC
	Coyoacán	Centro de Ciencias de la Atmósfera	CCA
	Cuajimalpa	Ex convento Desierto Leones	EDL
	Tlalpan	Ecoguardas Ajusco	EAJ
	Miguel Hidalgo	Lomas	LOM
	Magdalena Contreras	San Nicolás Totolapan	SNT
Sureste (SE)	Xochimilco	Corena	COR
	Milpa Alta	Milpa Alta	MPA

Tabla 4.1. Estaciones de la REDDA.

(Fuente: SEDEMA, 2016)

4.1.2 Programa de aseguramiento de calidad y control de calidad (QA/QC)

Con el objetivo de asegurar que una medición cumpla con un nivel establecido de confianza, se requiere un reglamento y un protocolo de procedimientos que asegure que cada medición cumple con normas de calidad. El aseguramiento de calidad (QA) y control de calidad (QC), ofrecen un programa de actividades para lograr estos objetivos durante la recolección y análisis del depósito húmedo.

El aseguramiento de calidad define los objetivos del muestreo y la calidad de los datos a obtener, la selección de los sitios de muestreo y el diseño de la red de monitoreo. Esto incluye la designación del sistema, la selección del equipo de medición, la evaluación del equipamiento y la capacitación de los operadores (WMO, 2004). El control de la calidad permite obtener una precisión establecida en la medición, la misma tiene como objetivo preparar protocolos que establezcan la capacitación adecuada de los operadores, así como la operación, mantenimiento y calibración de los equipos elegidos, lo mismo se logra mediante visitas al sitio, protocolos de inspección, verificación y validación de datos a través de un cronograma de auditoría en la red de muestreo acompañado de los reportes correspondientes (Cavazos, 2013).

Los objetivos planteados en los programas de recolecta y análisis del depósito atmosférico, del laboratorio de la SCA-CCA-UNAM, se basan en los recomendados por el NADP y la US-EPA (NADP,2004;US-EPA,1994) y las actividades del programa de aseguramiento y control de la calidad se lleva a cabo en cada etapa a través de una cadena de custodia donde los responsables registran la obtención de muestras, su transporte y entregas de estos al laboratorio para su análisis. En la Figura 4.2 se observa el protocolo para la colección de la muestra y su envío al laboratorio para su análisis.

Los recipientes utilizados para la recolección de agua de lluvia son cubetas de 6L y botellas de 500 mL, las cuales están fabricadas de polietileno de alta densidad (HDPE) de marca Nalgene, el cual es un material inerte a los componentes del agua de lluvia.

Las botellas se lavan y enjuagan con agua desionizada y su conductividad se registra antes de enviarlas a los sitios de muestreo no debe exceder el valor de 1.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$, para asegurar que la composición del agua de lluvia colectada en las mismas, no se altere o

sufra algún cambio durante su transporte. Una vez limpias, se transportan a los puntos de estudio y se almacenan en un sitio limpio y fresco.

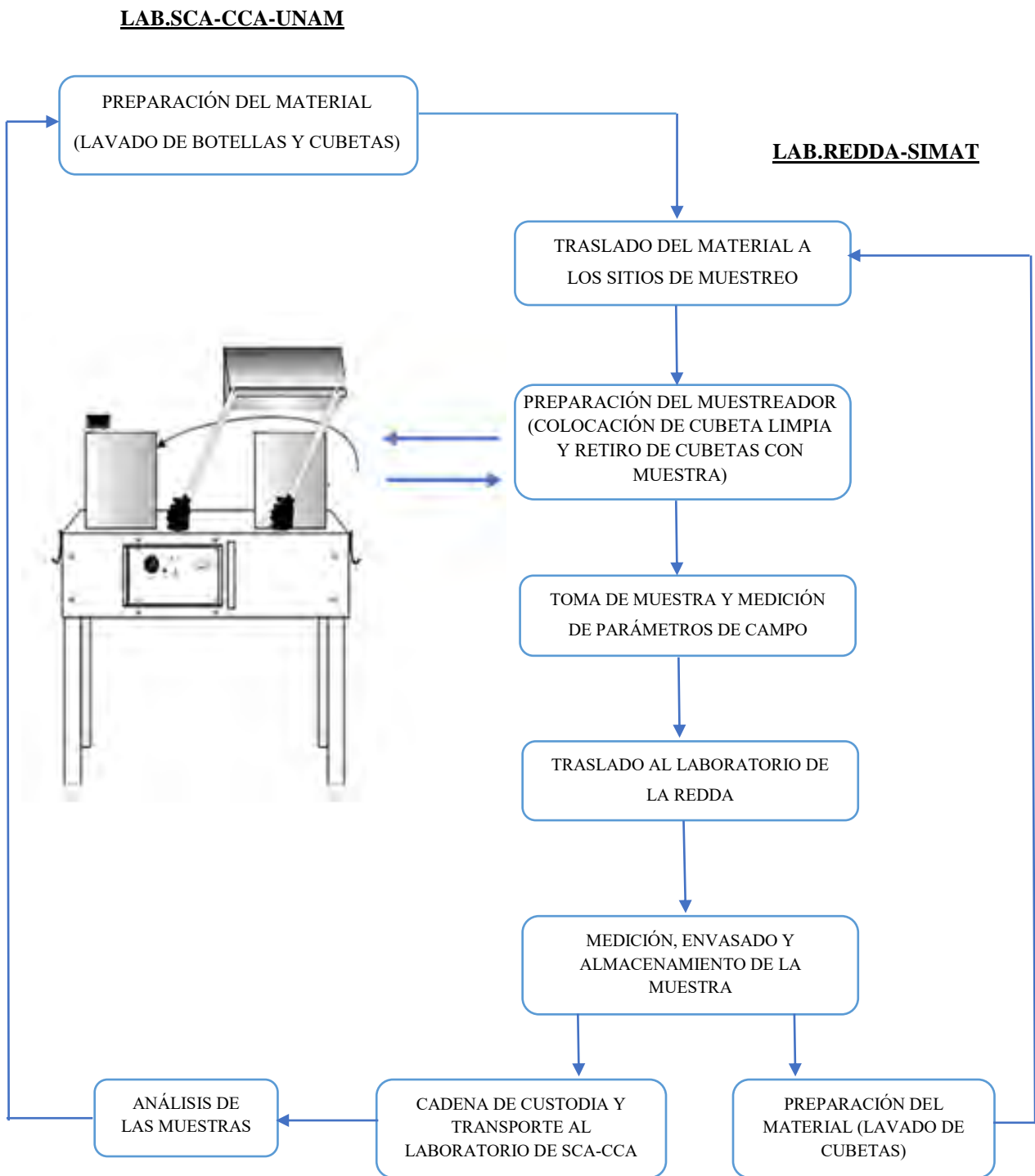


Figura 4.2 Protocolo de muestro de depósito atmosférico húmedo y seco.

(Fuente: Alarcón, 2012)

4.1.3 Colección de la muestra

Los equipos utilizados para el muestreo de lluvia consisten en un dispositivo de dos cubetas en las cuales se colecta el depósito seco y húmedo en forma separada, el primero incluye todo el material contaminante que ha sido transportado por el viento y depositado sobre la superficie del material de colección, mientras que el depósito húmedo incluye el agua de lluvia, granizo o nieve que al impactarse a tierra se considera una mezcla de partículas y gases (Figura 4.3).

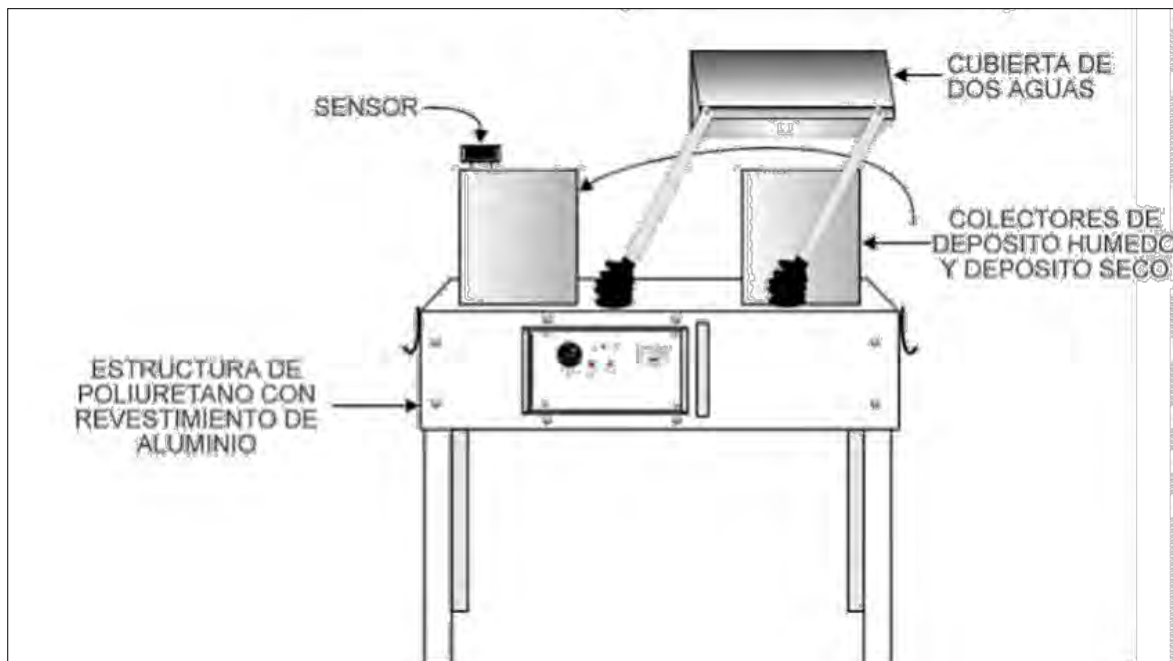


Figura 4.3 Muestreador de agua de lluvia, modelo ASP 78100.

(Fuente: SEDEMA, 1994)

Este sistema cuenta con un sensor, el cual, al detectar la presencia de lluvia, activa un mecanismo que destapa la cubeta destinada al depósito húmedo y tapa la cubeta de depósito seco, una vez terminado el evento de lluvia, el sistema vuelve a su posición original; esto evita el mezclado de las partículas de polvos con la lluvia, ya que, si se mezclan, no sería fácil distinguir qué proceso atmosférico incorporó las diferentes especies químicas.

Para coleccionar la muestra de depósito húmedo se retira la cubeta correspondiente colocando una nueva cubeta que ha sido lavada con agua desionizada y que ya está

limpia. De manera simultánea se toma lectura del volumen de precipitación del pluviómetro acoplado al colector, también se mide el pH y la conductividad de la muestra en campo. Una vez colectada la muestra en la botella de 500 mL, se etiqueta con los datos que se obtuvo de las mediciones en campo en un formato mostrado en la Figura 4.4, después se colocan en un refrigerador a 4°C hasta su envío al laboratorio de la SCA-CCA-UNAM en un plazo no mayor a una semana con el fin de evitar un cambio en la composición química de las muestras.

CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMOSFERA
Sección Contaminación Ambiental

DEPOSITO HUMEDO
IDENTIFICACION DE LA MUESTRA

Sitio de muestreo _____
 Período de muestreo _____
 Inicio del evento _____ Temperatura _____
 pH _____ Precipitación pluvial _____ mm

Figura 4.4 Etiqueta de registro para muestras de depósito húmedo en SCA-CCA-UNAM.

(Fuente: Alarcón, 2012)

Las muestras se reciben en el laboratorio por las Químicas responsables del mismo, (M.en I. Ana Luisa Alarcón Jiménez y Quím. María del Carmen Torres Barrera), quienes realizan el análisis de las mismas. Además, el responsable del laboratorio recibe un reporte donde se especifican los datos de las muestras colectadas, los mismos se hacen por triplicado, uno para el operador, otro para el encargado del laboratorio y uno más que se archiva en la SCA-CCA-UNAM, adicionalmente se lleva una bitácora en cada sitio con la información a detalle sobre el muestreo para aclarar dudas en caso necesario.

4.2 Análisis químico de las muestras

El análisis químico de las muestras en el laboratorio de la SCA-CCA-UNAM consistió en la determinación de los parámetros recomendados por el protocolo del NADP, los cuales son: pH, conductividad eléctrica, concentración de cationes: Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} y concentración de aniones: Cl^- , NO_3^- y SO_4^{2-} (NADP,2004).

La medición del pH de las muestras se realizó con la ayuda de dos potenciómetros, el ORION 960 y el METROHM 827, con electrodo combinado de vidrio a una temperatura de 25°C. Antes de la medición es necesario calibrar el instrumento con tres disoluciones buffer de pH=4, pH=7 y pH=10, trazables a NIST (National Institute of Standards and Technology), a una temperatura de 25°C.

La conductividad eléctrica se determinó a una temperatura de 25°C con un conductímetro meter HORIBA D-24, con un intervalo de 0.01 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 199.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$. El equipo se calibra con un estándar certificado y trazable a NIST de KCl con conductividad de 23.8 $\mu\text{S}/\text{cm}$, a una temperatura de 25°C.

La identificación y cuantificación de los iones de la lluvia se realizó utilizando cromatografía de intercambio iónico, basado en el Método EPA 300.1. Específicamente se trabajó con el cromatógrafo de líquidos Metrohm 850 Professional IC (Figura 4.5), el cual se utiliza para la determinación de aniones o sustancias polares por cromatografía iónica con supresión química mediante el Metrohm Suppressor Module (MSM).

A continuación, se describen las características de algunos componentes básicos del cromatógrafo utilizado (Manual 850 Professional IC. 2009):

- ✚ Sistema de supresión química secuencial de aniones con supresor adicional de CO_2 .
- ✚ Organizador de eluyentes.
- ✚ 2 detectores digitales de conductividad de alta sensibilidad
- ✚ 0–15 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de intervalo de conductividad.
- ✚ 0.0047 nS/cm de resolución.
- ✚ Ruido inferior a 0.2 nS/cm con supresión química.
- ✚ 0.8 μL de volumen de celda.
- ✚ Electrodo anulares de acero inoxidable.
- ✚ < 0.001 °C de estabilidad térmica.



Figura 4.5 Cromatógrafo Líquido 850 Professional IC.

(Fuente: Manual 850 Professional IC. 2009)

4.2.1 Tratamiento de los resultados de análisis químicos

Con el fin de validar los datos, los parámetros: conductividad eléctrica, concentración de cationes en mg/l: Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , y concentración de aniones en mg/l: Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} y HCO_3^- , se someten a un balance iónico y al comparativo entre la conductividad medida y conductividad calculada de acuerdo a las especificaciones de la WMO.

En el análisis de los resultados del pH, y concentración de iones del agua de lluvia se utilizó, el valor promedio ponderado anual. De esta manera al utilizar los promedios ponderados se ajustaron los valores con respecto a la contribución del volumen de lluvia.

Las concentraciones promedio ponderadas por volumen (CPPV) para los períodos lluviosos de los años desde el 2013 hasta el 2016 de cada estación expresadas para los iones en $\mu\text{Eq/L}$ se calcularon de acuerdo con la ecuación 4.1.

$$\text{CPPV} = \frac{\sum (\text{Cn} \times \text{Pn})}{\sum \text{Pperíodo}} \quad \text{Ec (4.1)}$$

Donde:

C_n= Concentración del analito obtenida en la muestra (µeq/l).

P_n= Los mm de precipitación total colectada para la muestra.

P_{período} = Sumatoria de los mm correspondientes al período de muestreo.

Se calculó la tasa de depósito húmedo (TDH) que representa el flujo iónico de masa hacia el ecosistema utilizando la ecuación 4.2:

$$TDH = C_n \times P_n \quad \text{Ec (4.2)}$$

Donde:

C_n= Concentración del analito obtenida en la muestra (ppm).

P_n= Los mm de lluvia caída en el mes o período (mm).

Las unidades de TDH son expresadas en kg/ha.

Se determinó el pH promedio ponderado para cada período a partir del valor promedio de la concentración de H⁺, aplicando la expresión:

$$[H^+] = \frac{P_i [H^+]}{\sum P_i} \quad \text{Ec. (4.3)}$$

Donde P_i es la precipitación en la semana i.

El pH final de la muestra es influido por la cantidad de lluvia o volumen de dilución

4.3 Datos de variables meteorológicas

Para determinar la influencia de la meteorología en el depósito atmosférico húmedo en la ZMCM, se consideró la información de la REDMET de los años 2013 a 2016 referente a temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento. En la Tabla 4.2 y Figura 4.6 se señalan las estaciones de la REDMET que se utilizaron en este trabajo, destacar que no se utilizaron todas las estaciones de la REDMET debido a que se escogieron aquellas estaciones que funcionaron durante los cuatro años estudiados y que hayan cumplido con la suficiencia de datos para que su estudio fuese representativo.

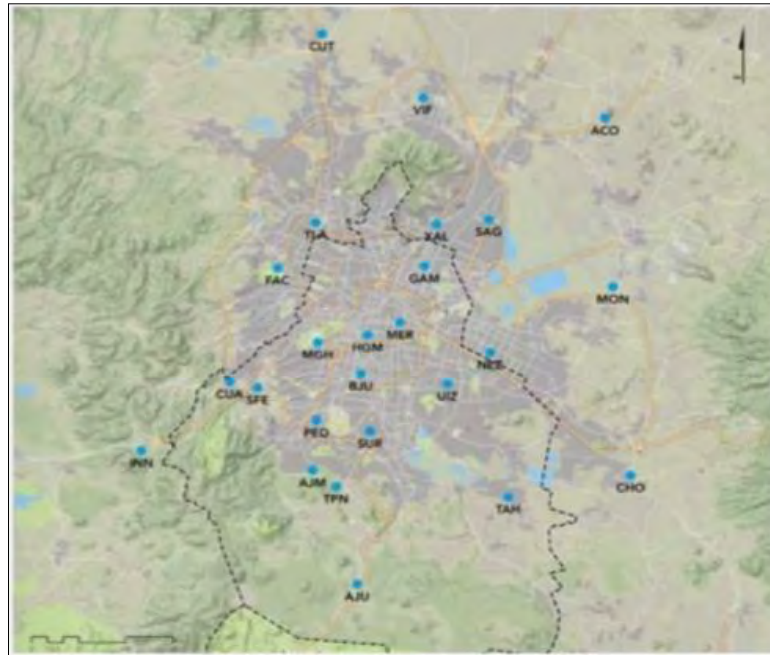


Figura 4.6 Estaciones de la Red de Meteorología. SIMAT

(Fuente: SEDEMA, 2016)

ZONA	DELEGACIÓN O MUNICIPIO	ESTACIÓN	CLAVE
Noroeste (NO)	Tepotzotlán	Cuautitlán	CUT
	Naucalpan de Juárez	FES Acatlán	FAC
	Tlalnepantla de Baz	Tlalnepantla	TLA
Noreste (NE)	Acolman	Acolman	ACO
	Texcoco	Montecillo	MON
	Ecatepec de Morelos	San Agustín	SAG
	Coacalco de Berriozábal	Villa de flores	VIF
	Ecatepec de Morelos	Xalostoc	XAL
	Nezahualcóyotl	Nezahualcóyotl	NEZ
Centro (C)	Venustiano Carranza	Merced	MER
	Cuauhtémoc	Hospital General de México	HGM
Suroeste (SO)	Cuajimalpa de Morelos	Cuajimalpa	CUA
	Álvaro Obregón	Pedregal	PED
	Cuajimalpa de Morelos	Santa Fe	SFE
Sureste (SE)	Chalco	Chalco	CHO
	Xochimilco	Tláhuac	TAH

Tabla 4.2. Estaciones de la REDMET. SIMAT.

(Fuente: SEDEMA, 2016)

En el caso de la información meteorológica referente a la estación del CCA, fue obtenida desde la página de la RUOA (<http://www.ruoa.unam.mx/>).

4.4 Métodos y softwares estadísticos utilizados

4.4.1 Análisis de correlación mediante el método de Spearman

Mediante el software SPSS 22 (Statistical Package for the Social Sciences) se aplicó la prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov a los datos y se determinó que no tenían una distribución normal por lo que para determinar la correlación se emplearon pruebas no paramétricas como el Coeficiente de correlación de Spearman (Rho de Spearman) el cual es una medida de asociación lineal que utiliza los rangos, números de orden, de cada grupo de sujetos y compara dichos rangos.

Aparte de permitir conocer el grado de asociación entre ambas variables, con Rho de Spearman es posible determinar la dependencia o independencia de dos variables aleatorias (Elorza y Medina, 1999).

La fórmula de este coeficiente es:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2-1)} \quad \text{Ec. (4.4)}$$

Siendo:

n = La cantidad de sujetos que se clasifican

x_i =El rango de sujetos i con respecto a una variable

y_i = El rango de sujetos i con respecto a una segunda variable

$$d_i = x_i - y_i \quad \text{Ec. (4.5)}$$

Es decir que d_i , es la diferencia entre los rangos de X e Y (Anderson et al., 1999).

El coeficiente de correlación de rangos de Spearman puede puntuar desde -1.0 hasta +1.0, y se interpreta así: los valores cercanos a +1.0, indican que existe una fuerte asociación entre las clasificaciones, es decir, a medida que aumenta un rango el otro también aumenta; los valores cercanos a -1.0 señalan que hay una fuerte asociación

negativa entre las clasificaciones, es decir que, al aumentar un rango, el otro decrece. Cuando el valor es 0.0, no hay correlación (Anderson et al., 1999).

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) (Figura 4.7):

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

Figura 4.7 Intervalos y relación de la correlación de Spearman.

(Fuente: Hernández y Fernández, 1998)

Es necesario tener en consideración la significancia del valor de r_s , dada por el valor de ρ que lo acompaña. Cuando el valor de ρ es menor que 0.05, se puede concluir que la correlación es significativa, lo que indica una relación real, no debida al azar.

4.4.2 Software estadísticos

El análisis estadístico de este trabajo se realizó utilizando los siguientes softwares estadísticos:

- ✚ El IBM SPSS Statistics 22 es un software estadístico que ofrece técnicas de recolección de datos y analítica predictiva para solucionar múltiples problemas empresariales y de investigación. Brinda varias técnicas, que incluyen pruebas de

hipótesis lo que facilita la gestión de los datos, la selección y la ejecución de análisis y el intercambio de resultados, así como análisis multivariados y de sobrevida.

✚ OpenAir es un programa para el análisis de datos de calidad del aire que usa el software de análisis estadístico / de datos R como plataforma: un potente lenguaje de programación de código abierto ideal para el análisis profundo de datos. OpenAir proporciona un conjunto de herramientas gratuitas y de código abierto disponibles para todos. Además, pone a disposición una gama de técnicas existentes y desarrolladas para el análisis de datos de contaminación del aire facilitando la realización de análisis sofisticados de manera rápida, interactiva y reproducible.

En el caso de OpenAir se utilizaron las siguientes funciones:

- Función boxplot que representa gráficas de cajas o cajas de Tukey, así llamadas por su ideólogo, las cuales son gráficas muy sencillas, a la par que, de gran potencia, para la representación de series de datos de forma que en un solo gráfico se pueda tener información completa sobre la simetría, la dispersión y el sesgo de los datos (Figura 4.8).

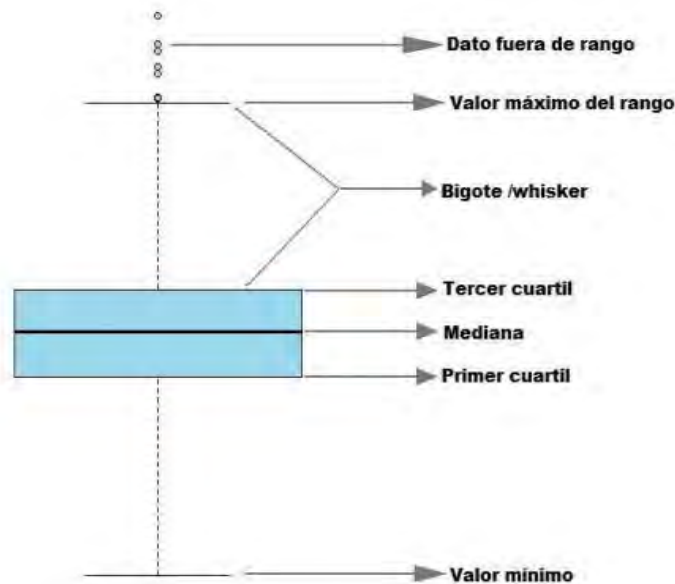


Figura 4.8 Gráfico boxplot realizado en OpenAir.

(Fuente: Follos, 2012)

- Función corPlot, que representa una matriz cruzada con los parámetros de nuestro conjunto de datos que deseemos, estableciendo su correlación por pares, pero mejorando las opciones de representación normales de forma que la interpretación de la gráfica sea mucho más sencilla e intuitiva, observándose la escala de -100 (Azul) a 100 (Rojo), donde el primero representa las correlaciones negativas y el segundo las correlaciones positivas (Figura 4.9).

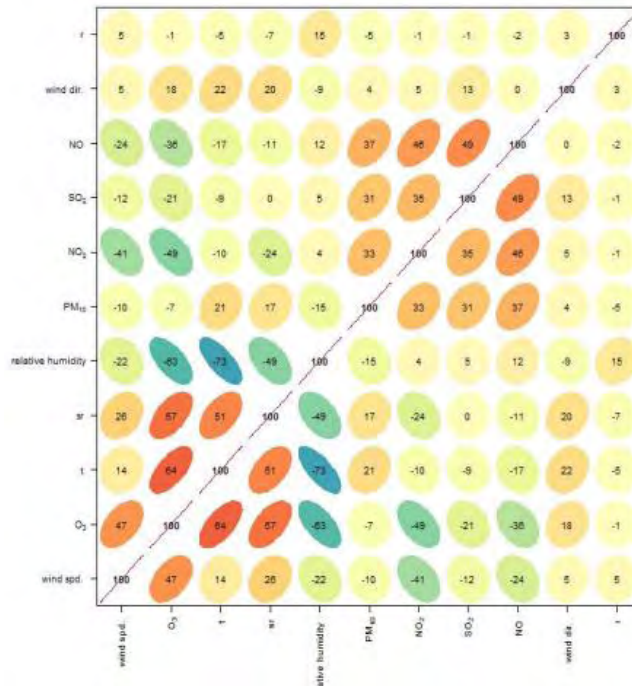


Figura 4.9 Gráfico de correlación realizado en OpenAir.

(Fuente: Follos, 2012)

4.5 HYSPLIT

El modelo de transporte y dispersión HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) está diseñado para calcular trayectorias simples y complejas de transporte, dispersión, transformación química y depósito de los contaminantes. Como se explicó en el Capítulo II, en este trabajo se utilizará este modelo para hacer un análisis de las trayectorias de retroceso, para determinar el origen de las masas de aire y establecer las relaciones fuente-receptor.

Este programa lo usamos libremente desde su página web. La escala vertical que usamos fue la de metros sobre el nivel del suelo (AGL) y se introdujo al programa el día y la hora

de los eventos de precipitación muestreados en la estación del CCA, se eligió esta estación pues es la que realiza muestreos diarios en nuestra área de estudio, además, se utilizaron cuatro niveles de referencia: 100, 200, 350 y 500.

El método de cálculo del modelo es un híbrido entre el enfoque lagrangiano y el euleriano. El cálculo de la advección y difusión lo realiza en un marco lagrangiano, mientras que para la concentración utiliza un marco euleriano.

La aproximación lagrangiana describe la concentración de un contaminante en términos de las propiedades estadísticas de los desplazamientos de las partículas del fluido. Cuando se utiliza esta metodología, las concentraciones se computan sumando la contribución de cada “puff” o bocanada de contaminante que se transporta a través de la malla siguiendo su trayectoria. El método euleriano describe la concentración en términos de las velocidades eulerianas del fluido, es decir, velocidades medidas en puntos fijos. La concentración en cada celda de la malla se calcula integrando el flujo de contaminantes correspondiente a cada interfaz de cada celda proveniente de la dispersión y advección de dicho contaminante (Draxler et al., 2009).

HYSPLIT funciona básicamente a partir de los campos de viento generados por los diferentes modelos meteorológicos, estos campos de viento y en general para temperatura y presión atmosférica (solo por citar algunos); se encuentran divididos en mallas, en este trabajo se usó el Archivo NARR (Campos GRIB-1 archivados del modelo de reanálisis regional de América del Norte) con una resolución de 32 km. Cada uno de los puntos de la malla meteorológica se asocia a un valor de las variables meteorológica correspondiente a ese punto.

El cálculo de las trayectorias lo hace de la siguiente manera:

Si se supone que una partícula se deja llevar por el viento pasivamente, entonces su trayectoria estará representada por la integral en tiempo y espacio del vector de posición. La posición final se calcula a partir de la velocidad promedio entre la posición inicial (P) y la posición de primera aproximación (P') (Draxler et al., 2009).

$$P(t+\Delta t) = P(t) + 0.5 [V(P,t) + V(P',t+\Delta t)] \Delta t \quad \text{Ec. (4.6)}$$

$$P'(t+\Delta t) = P(t) + V(P,t) \Delta t \quad \text{Ec. (4.7)}$$

El tiempo de integración es variable:

$$V_{\max} \Delta t < 0.75 \quad \text{Ec. (4.8)}$$

Los datos meteorológicos se mantienen en su sistema de coordenadas horizontales originales. Por otra parte, estos datos se interpolan a un sistema de coordenadas verticales internas que siguen el terreno (σ) (Draxler et al., 2009):

$$\sigma = (Z_{\text{top}} - Z_{\text{msl}}) / (Z_{\text{top}} - Z_{\text{gl}}) \quad \text{Ec. (4.9)}$$

Siendo:

Z_{top} = Tope del sistema de coordenadas del modelo de trayectoria

Z_{gl} = Altura del nivel de suelo

Z_{msl} = altura de la coordenada interna

Las alturas internas del modelo se pueden elegir de forma libre, sin embargo, una vez determinadas las alturas hay una relación predeterminada entre estas y el nivel vertical (k) del modelo, dada por la siguiente ecuación (Draxler et al., 2009):

$$Z_{\text{agl}} = ak^2 + bk + c \quad \text{Ec. (4.10)}$$

Las constantes se definen automáticamente de tal manera que la resolución interna del modelo sea la misma o mayor que la resolución vertical de los datos de entrada (Draxler et al., 2009).

CAPÍTULO V
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Introducción

Este capítulo tiene como objetivo realizar una caracterización de la meteorología y del depósito atmosférico húmedo de la ZMCM y determinar la relación que tienen entre ambas. Para lograr el cumplimiento de este objetivo, se realizó el tratamiento de los datos experimentales aportados por la REDMET y la REDDA de la Ciudad de México, permitiendo analizar las bases de parámetros meteorológicos como la dirección y velocidad del viento, temperatura, humedad relativa y precipitación, además de las bases de datos de aniones y cationes de la lluvia, pH y conductividad obtenidos durante el período lluvioso de 4 años, que abarca desde el 2013 hasta 2016.

5.2 Comportamiento de las variables meteorológicas en la ZMCM

La Figura 5.1 muestra el comportamiento de la velocidad del viento (WSP), la humedad relativa (HR), la temperatura (TMP) y la precipitación (PP) en el período lluvioso de cada año estudiado para la ZMCM.

Para el período completo, la velocidad del viento promedio fue de 2 m/s, llegando a tener velocidades mínimas de 0.5 m/s y máximas de 5.5 m/s. Además, el año con mayores velocidades promedios fue el 2016 seguido de los años 2013, 2015 y 2014 (2.07 m/s, 2.02 m/s, 2 m/s y 1.99 m/s, respectivamente).

La humedad relativa para el período de estudio presentó, una media de 65.2% y valores mínimos y máximos del orden de los 10.4% y 94.2%, respectivamente, el año 2015 mostró mayores valores promedios de esta variable en comparación con los demás, seguido del 2014, 2016 y 2013 (66.48%, 64.82%, 64.36% y 62.98%, respectivamente).

La temperatura promedio fue de 17°C, con valores mínimos de 3.7°C y máximos de 30°C. Los años 2015 (17.16°C) y 2016 (17.01°C) fueron los que presentaron mayores valores promedios de temperatura seguido por el año 2014 (16.82°C) y el año 2013 (16.79°C). Cabe señalar que según los Informe Anuales de Calidad del Aire del 2015 y 2016 elaborados por el SIMAT el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur 2015-2016 (ENOS), el cual comenzó en el segundo semestre del 2015 y en los primeros meses del 2016, fue disminuyendo intensidad hasta hacer su paso hacia una condición neutral, tuvo una gran

influencia en las temperaturas de estos años, llevándolos hacer los años más cálidos desde 1971.

La precipitación exhibió un promedio de 35.8 mm con valores máximos y mínimos de 76.4 mm y 3.6 mm, respectivamente. El comportamiento de los acumulados, para cada uno de los años estudiados fue totalmente distinto si se comparan con la temperatura, ya que, el año de mayor acumulado fue el 2014, seguido del 2013, 2016 y 2015, los cuales presentaron valores de 17 312 mm, 15 301.56 mm, 13 124.9 mm y 12 993.70 mm, respectivamente. El fenómeno de El Niño influyó en este comportamiento, ya que, como la zona intertropical de convergencia del Pacífico del este tiende a permanecer más cercana del ecuador en la presencia de un evento de El Niño de gran intensidad, como el ocurrido en 2015-2016, fue inhibida la fuente de humedad para las lluvias proveniente del oeste, lo que posibilitó la disminución de las lluvias en nuestra área de estudio.

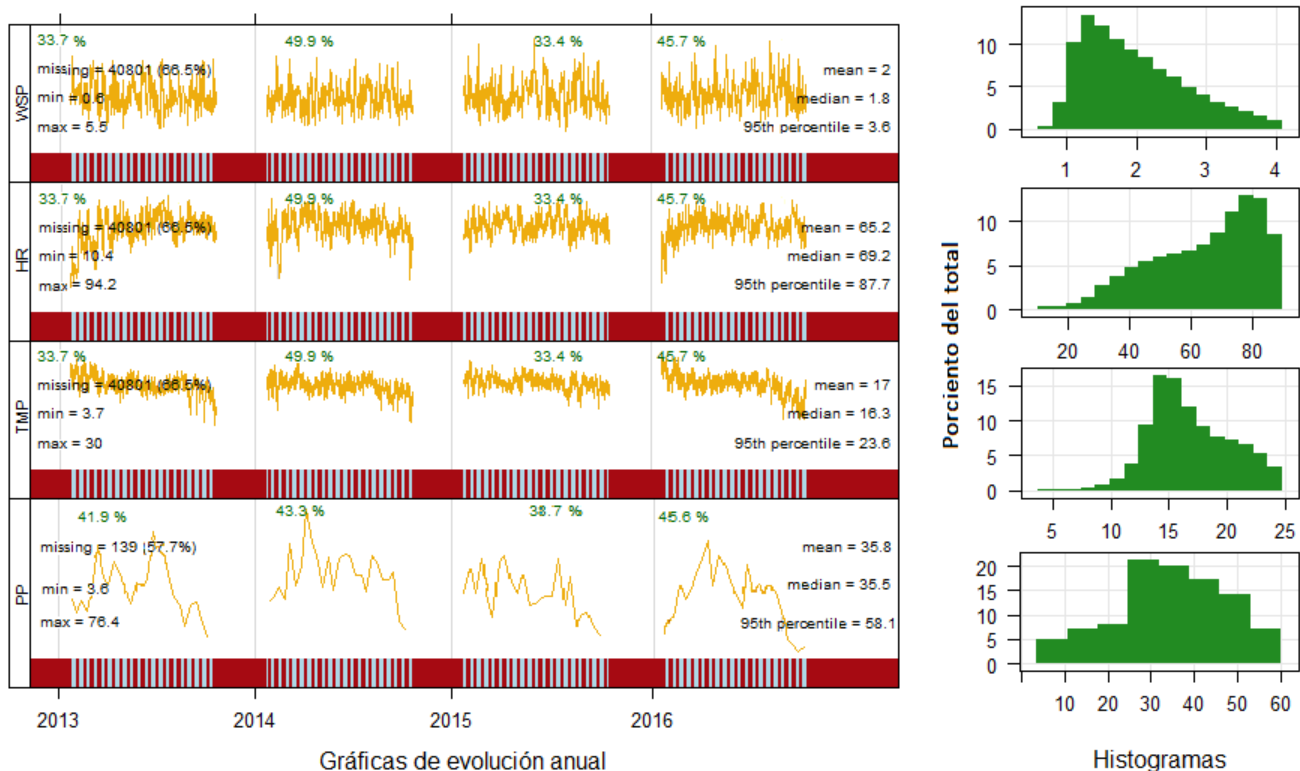


Figura 5.1 Gráficos resumen de WSP en m/s, HR en %, TMP en °C y PP en mm, en los años de estudio. En la parte derecha se observa el comportamiento por año de estas variables y en la parte izquierda sus histogramas.

Además, en los histogramas de la Figura 5.1 se puede observar cómo estas variables no presentan una distribución normal para estos cuatro años, ya que como es un período de tiempo muy corto se tuvo en las mismas una gran variabilidad.

Como se puede ver en las rosas de viento correspondientes a cada año mostradas en la Figura 5.2, las direcciones del viento predominantes en la ZMCM son las del norte, noroeste y noreste, lo que propicia que los contaminantes se trasladen hacia el sur, donde, debido a la presencia de la zona montañosa los contaminantes tienden a su acumulación, además como en esta zona la temperatura y la presión favorecen la condensación de la humedad atmosférica y con ello la lluvia, se hace propicio que la región del sur de la ZMCM presente pH más ácidos en comparación con las demás regiones estudiadas. Igualmente, la Figura 5.2 muestra como en el año 2015 (7%) hubo mayor porcentaje de viento en calma, seguido por el 2013 (4.5%), 2016 (2%) y 2014 (0%). Lo cual indica el comportamiento de la dispersión de los contaminantes atmosféricos en dichos años, ya que al aumentar el porcentaje en calma de los vientos hay menos dispersión y por lo tanto mayor concentración de los contaminantes.

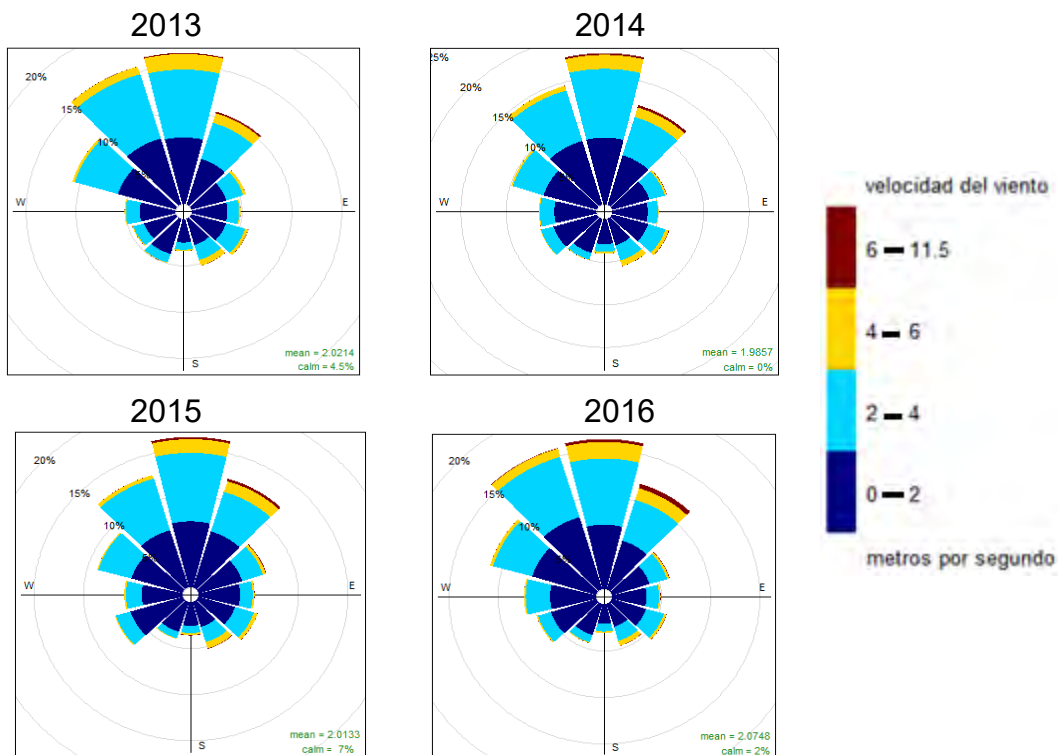


Figura 5.2 Rosas de viento anuales para los años estudiados.

En los siguientes apartados se muestran los diagramas de cajas calculados a partir de los valores horarios de temperatura, humedad relativa y velocidad del viento correspondientes a los períodos lluviosos 2013-2016 para cada una de las estaciones seleccionadas, en el caso de la precipitación, los diagramas de cajas se realizaron con valores de acumulados semanales. Con el fin de favorecer una mayor interpretación y comparación de los resultados obtenidos se han presentado estos diagramas de acuerdo con la posición geográfica de las estaciones meteorológicas. Además, para conocer la dirección del viento predominante en nuestra área de estudio, se muestran las rosas de viento correspondientes a cada estación seleccionada.

5.2.1 Temperatura

En la Figura 5.3 se muestra la distribución espacial de la temperatura en la zona de estudio a través del comportamiento de esta variable en cada una de las estaciones seleccionadas de la REDMET que operaron de manera continua durante los cuatro años de estudio y cumplieron con la suficiencia de datos (75% de los datos).

Una visión conjunta de los resultados de la temperatura (Figura 5.3) permite establecer un intervalo de variación aproximado de 2°C entre los valores medios calculados para cada una de las estaciones, registrando un valor máximo promedio de 18.29°C correspondiente a la estación San Agustín (SAG) ubicada en el noreste de la ZMCM y un mínimo de 14.41°C en la estación Cuajimalpa (CUA) ubicada en la zona montañosa al suroeste de la ZMCM.

Conjuntamente se puede apreciar en la Figura 5.3 como se llegan a tener valores máximos de temperatura del orden de los 33°C y mínimos alrededor de los -3.4°C. Simultáneamente, se nota la diferencia de valores de temperatura entre las estaciones ubicadas en la zona urbana y las ubicadas en la periferia. Las estaciones ubicadas en la zona urbana como San Agustín (SAG), Hospital General de México (HGM) y Merced (MER), muestran mayores valores promedios de temperatura debido a factores urbanos de tipo local que generan el fenómeno de isla de calor, mientras que las estaciones localizadas en las zonas de la periferia de la ciudad y que poseen elevación, como Cuajimalpa (CUA), Cuautitlán (CUT) y Santa Fe (SFE), reportaron promedios menores de temperatura.

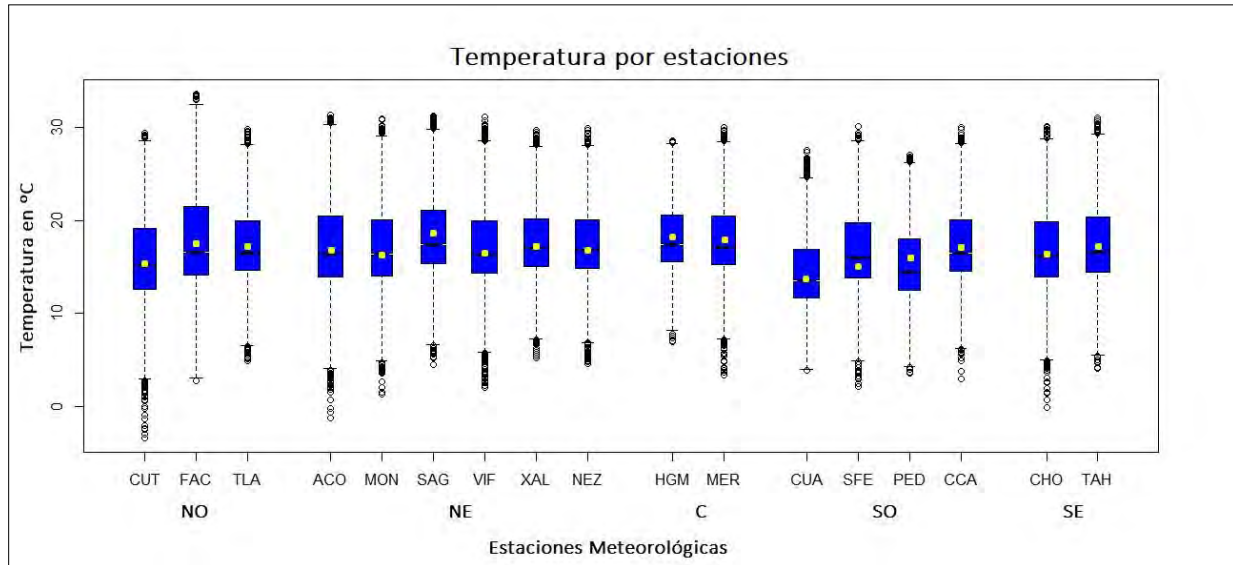


Figura 5.3 Comportamiento de la temperatura para cada estación de muestreo, 2013-2016. Los puntos amarillos hacen referencia a la media de los datos y la línea negra a la mediana.

Asimismo, se observa en la Figura 5.3 que en ninguna de las estaciones el conjunto de valores posee una distribución simétrica (segundo cuartil = media aritmética), informando tanto el signo como la intensidad de esta diferencia sobre la magnitud y frecuencia de ocurrencia del tipo de valores presentes en cada una de las series. Una asimetría positiva (media > segundo cuartil) indica la presencia de valores elevados, pero poco frecuentes, mientras que una asimetría negativa (media < segundo cuartil) representa la presencia de una mayor frecuencia de valores de menor intensidad. En este sentido (Figura 5.3) se observa un predominio de valores medios superiores al segundo cuartil en las estaciones, lo que nos da una idea de que los valores entre el 50% y el 75% de los datos están más dispersos y que esta variable en la mayoría de las estaciones presenta una asimetría positiva.

5.2.2 Humedad Relativa

La humedad relativa (Figura 5.4) registró una elevada variación espacial del valor medio. En este caso, los valores medios oscilaron entre el 74% medido en la estación Cuautitlán (CUT) y el 57 % obtenido en la estación Hospital General de México (HGM).

Nótese que las diferencias de humedad relativa entre las estaciones están dadas también por las diferentes ubicaciones de las mismas, como se explicó en el apartado anterior.

Aquellas estaciones situadas en la zona montañosa de nuestra área de estudio como Cuautitlán (CUT), Cuajimalpa (CUA) y Santa Fe (SFE), mostraron valores de humedad relativa mayores que las ubicadas en la zona urbana, esto es debido a que el sistema montañoso favorece una mayor precipitación y en consecuencia mayores porcentos de humedad.

Además, hay que agregar que los sistemas ciclónicos que afectaron el país en este período aportaron a el aumento de la humedad relativa y la precipitación lo que posibilitó que el año 2015 fuese el año con mayores valores de esta variable en comparación con los demás años contemplados en este estudio, debido al transporte de humedad desde el Pacífico hacia la ZMCM.

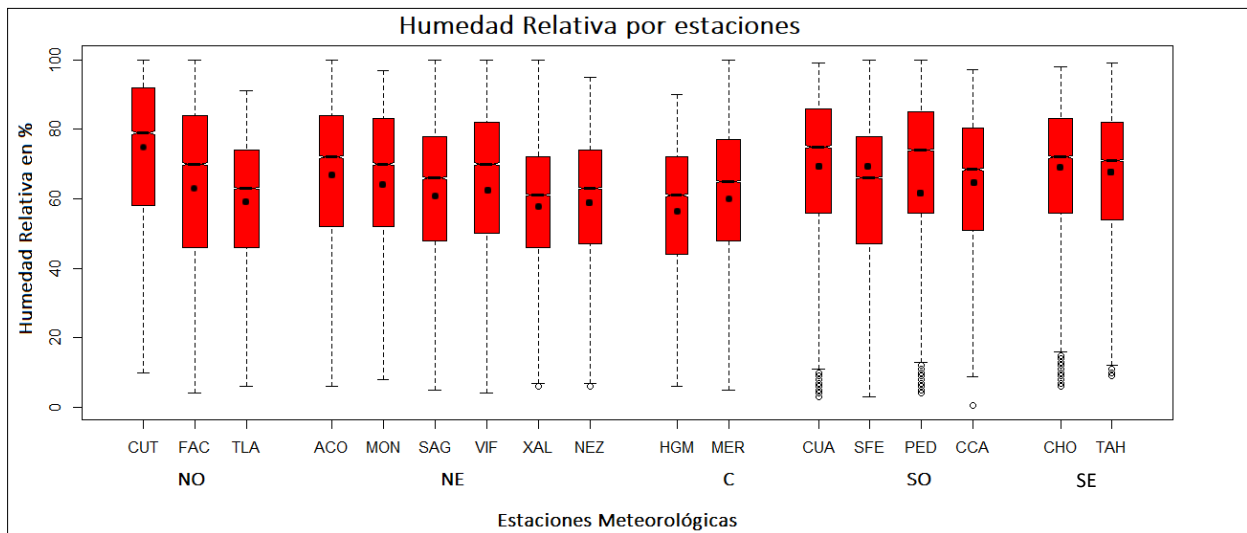


Figura 5.4 Comportamiento de la humedad relativa por estaciones de muestreo, 2013-2016. Los puntos negros hacen referencia a la media de los datos y la línea negra a la mediana.

En la Figura 5.4 puede apreciarse que la humedad relativa, al igual que la temperatura, no presenta, en ninguna de las estaciones, una distribución simétrica, pero a diferencia de la primera, la humedad relativa muestra una tendencia hacia una asimetría negativa, dando idea de la alta frecuencia de valores de humedad por debajo de la mediana en todas las estaciones.

5.2.3 Velocidad y dirección del viento

La velocidad del viento (Figura 5.5) registró una variación espacial del valor medio del orden de los 1.12 m/s, registrándose un valor promedio máximo de 2.66 m/s en la estación de Xalostoc (XAL) y un valor promedio mínimo de 1.54 m/s en la estación Cuautitlán (CUT). Igualmente, se puede observar que la velocidad del viento no presenta una distribución simétrica, ya que muestra una tendencia general hacia una asimetría positiva, dando la idea de la dispersión de valores de velocidad del viento por encima de la mediana, en todas las estaciones.

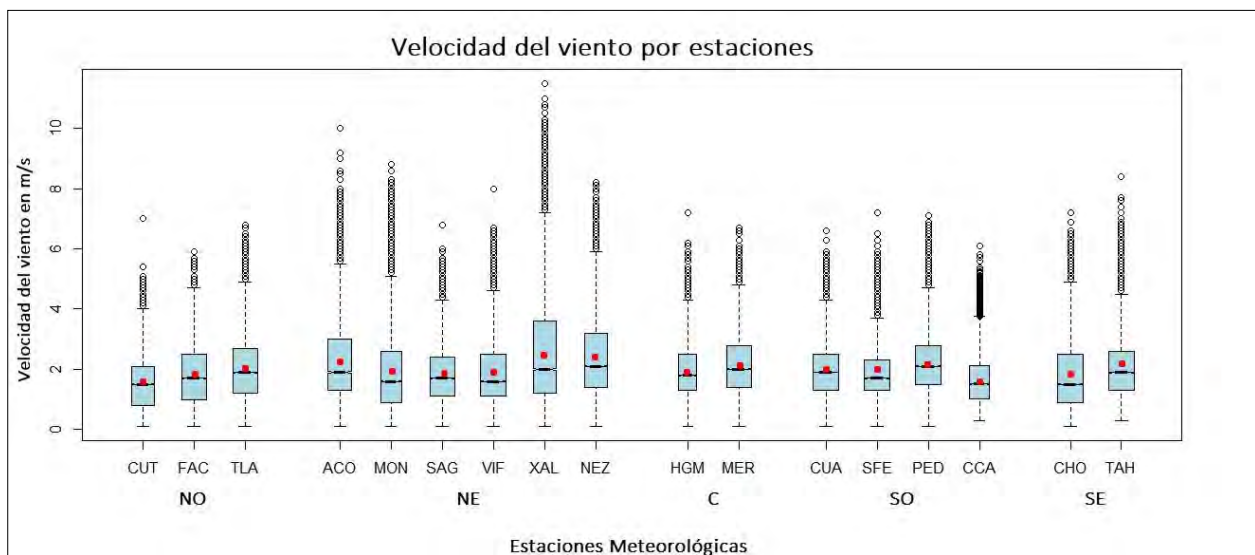


Figura 5.5 Comportamiento de la velocidad del viento por estaciones de muestreo, 2013-2016.

Los puntos rojos hacen referencia a la media de los datos y la raya negra a la mediana.

Como se puede observar en la Figura 5.6, la dirección predominante del viento es del norte, lo que contribuye a que la dispersión de los contaminantes al moverse desde el norte hacia el sur o al oeste sea limitada, logrando que estos se acumulen en las laderas montañosas. Asimismo, se puede apreciar que en algunas estaciones también hay una marcada dirección sureste del viento, en este caso, la dirección del sur hacia el norte, favorece a que los contaminantes posean una mejor dispersión y logren salir de nuestra área de estudio.

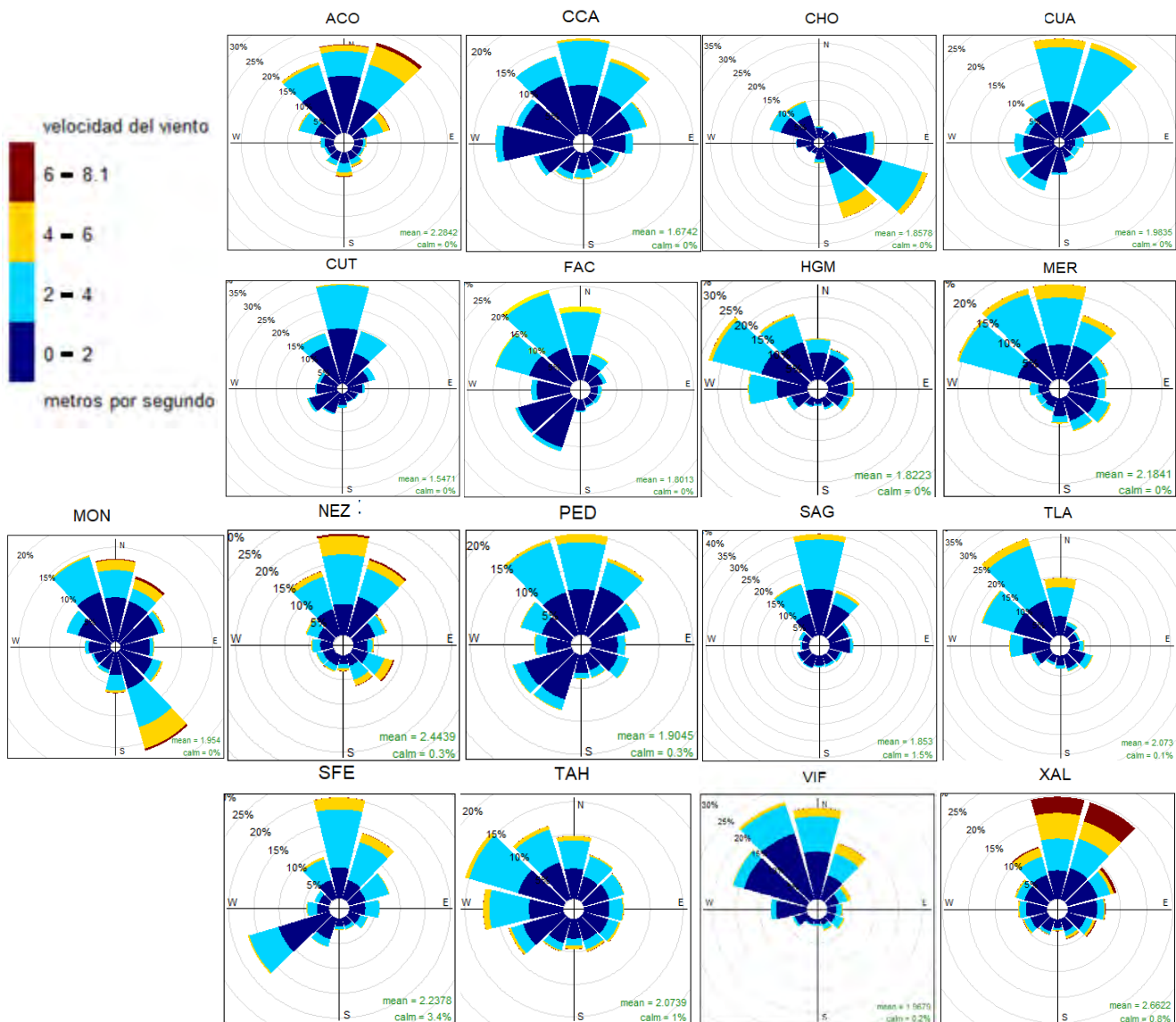


Figura 5.6 Rosas de viento por estaciones de monitoreo meteorológico, 2013-2016.

Por otra parte, la dirección del viento en la ZMCM es condicionada por las montañas que la rodean propiciando los fenómenos conocidos como brisa de valle o vientos anabáticos y brisa de montaña o vientos catabáticos. El primero de estos ocurre durante el día cuando las laderas se calientan más rápidamente que los valles, propiciando, que el flujo de aire vaya desde el valle hacia las partes más altas de las montañas que hacen de centros de baja respecto a los fondos del valle. El segundo fenómeno se produce en la noche debido al enfriamiento rápido de las laderas respecto al valle propiciando que los vientos cambien (SEDEMA, 2006).

Según el Informe Anual de Calidad del Aire 2015 elaborado por el SIMAT, la brisa de montaña hace que el viento converja en el centro y norte de nuestra área de estudio, provocando, una acumulación de los contaminantes durante las mañanas y luego cuando ocurre la brisa de valle estos contaminantes son arrastrados desde el norte y centro de la ciudad hacia el sur, los cuales, debido a la zona montañosa permanecen parcialmente estancados (SEDEMA, 2016).

Otro factor importante es el flujo de los vientos sinópticos, el cual provoca la desaparición de la circulación local, específicamente en la época lluviosa, el cual se caracteriza por corrientes de alisios húmedas, en la que los vientos generalmente son débiles y con un alto contenido de humedad (Jáuregui, 1988).

5.2.4 Precipitación

La precipitación (Figura 5.7) registró una elevada variación espacial del valor medio. En este caso, se obtuvo como valor promedio máximo el medido en la estación Ex Convento Desierto de los Leones (EDL) el cual corresponde a 62.1 mm y como valor promedio mínimo al medido en la estación Milpa Alta (MPA) correspondiente a 22.7 mm. Al igual que la velocidad del viento la precipitación no presenta una distribución simétrica, ya que muestra en todas las estaciones una tendencia general hacia una asimetría positiva, dando la idea de la dispersión de valores por encima de la mediana.

Como se puede apreciar en la Figura 5.7, en el período de estudio se tuvo acumulados semanales máximos del orden de los 188 mm y acumulados mínimos del orden de los 0.42 mm. También se puede ver como en la zona suroeste de nuestra área de estudio se presentan los mayores acumulados de precipitación, lo cual está provocado por el efecto orográfico de las montañas que refuerzan los movimientos ascendentes y con ello, la intensidad de la precipitación hacia esa zona, además, las precipitaciones de forma general en la ZMCM están moduladas en gran medida por el paso de ondas del este, que aportan un flujo de humedad desde el Golfo de México. En el Anexo A.I se puede ver la distribución espacial de la precipitación por estaciones en la ZMCM donde se evidencia claramente el comportamiento explicado anteriormente.

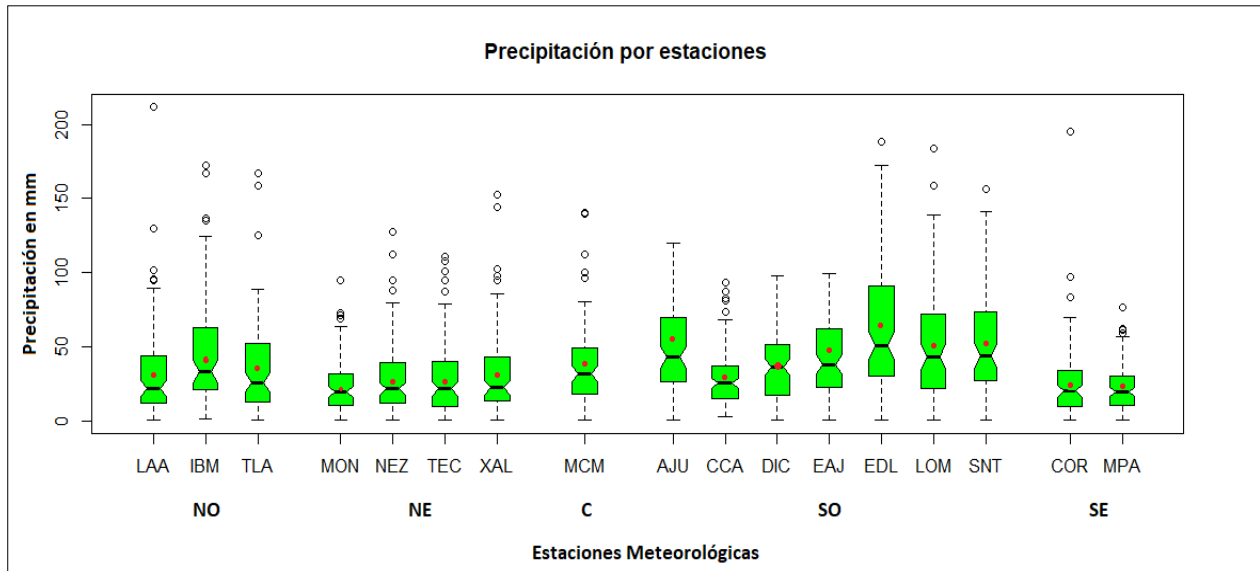


Figura 5.7 Comportamiento de la precipitación por estaciones de muestreo, 2013-2016. Los puntos rojos hacen referencia a la media de los datos y la línea negra a la mediana.

5.3 Variabilidad espacial y temporal del pH, conductividad eléctrica y componentes químicos de la precipitación en la ZMCM

5.3.1 Variabilidad espacial y temporal del pH y conductividad eléctrica

Para este trabajo, como se muestra en la Figura 5.8, se utilizó un total de 1629 muestras, de las cuales, 965 fueron muestras con pH mayor o igual a 5.6 equivalente al 59% del total, 570 fueron muestras con pH menor a 5.6 correspondientes al 35% del total y las 94 muestras restantes fueron imposibles de analizar por no tener volumen suficiente de lluvia (<50 mL).

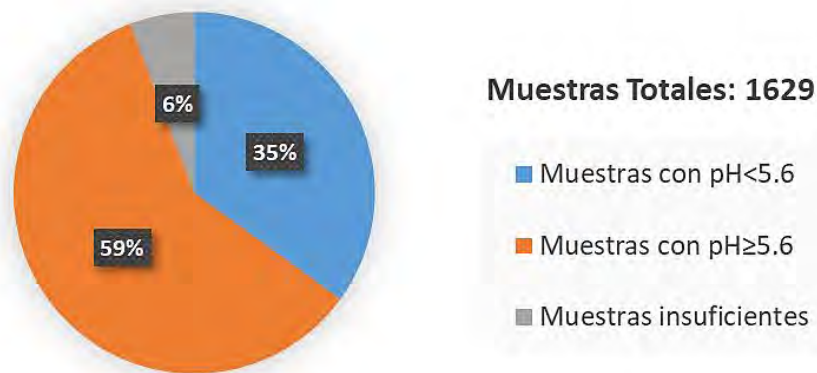


Figura 5.8 Relación de las muestras analizadas en el laboratorio de la SCA-CCA.

El comportamiento del pH en cada uno de los años de estudio (Figura 5.9) indica que el año 2015 fue el que presentó mayor acidez, llegando a tener valores de pH que no sobrepasaron los 5.40 unidades, es decir, todos los promedios ponderados anuales en cada estación fueron ácidos, destacar que en este año se presentaron ciertas condiciones que en comparación con los demás años estudiados posibilitaron la disminución del pH, como por ejemplo, mayor porcentaje de viento en calma posibilitando el estancamiento de los contaminantes, la presencia de precipitación en un lapso más grande de tiempo, lo que posibilitó que tuviese más tiempo de residencia en la atmósfera y por lo tanto incorporaran más partículas de aerosoles, gases y mayor actividad del volcán Popocatepetl. Mientras que el año que se comportó más alcalino respecto a los demás estudiados fue el 2016, siendo este año el tercero de mayor precipitación y el segundo en menor porcentaje de viento en calma, lo que posibilitó mayor dilución y dispersión de los contaminantes.

Más a detalle, de acuerdo con la Figura 5.9, en los años 2013 y 2014 las estaciones localizadas al sur de nuestra área de estudio fueron las que presentaron más acidez, destacándose como la más ácida, la estación de Ajusco (AJU), llegando a registrar valores de promedio ponderado anuales de pH igual a 4.4 en el año 2013 y 4.56 en el año 2014. En los años 2015 y 2016 la zona más ácida se desplazó hacia el sureste presentándose como Milpa Alta (MPA) la estación con menores valores promedio ponderado anual de pH respecto a las demás, llegando a tener valores aproximados de 4.6 en el año 2015 y de 4.90 en el año 2016. Enfatizar que este comportamiento ocurrió así, debido a que como la dirección predominante del viento en la ZMCM es de norte a sur los contaminantes generados en la zona industrializada del área de estudio, encontrándose en la parte norte de la misma, se transportan hacia el sur y por ende se aumentaron las concentraciones de los iones en lluvia de estos lugares.

Las estaciones de muestreo más alcalinas se encontraron (Figura 5.9) en la parte noreste del área de estudio, destacándose la estación de Xalostoc (XAL) como la del promedio ponderado más alcalino respecto a las demás en los años 2013, 2014 y 2016. En el año 2015 la estación con valores promedios ponderados más alcalinos fue San Nicolás Totolapan (SNT) ubicada al suroeste de la ZMCM.

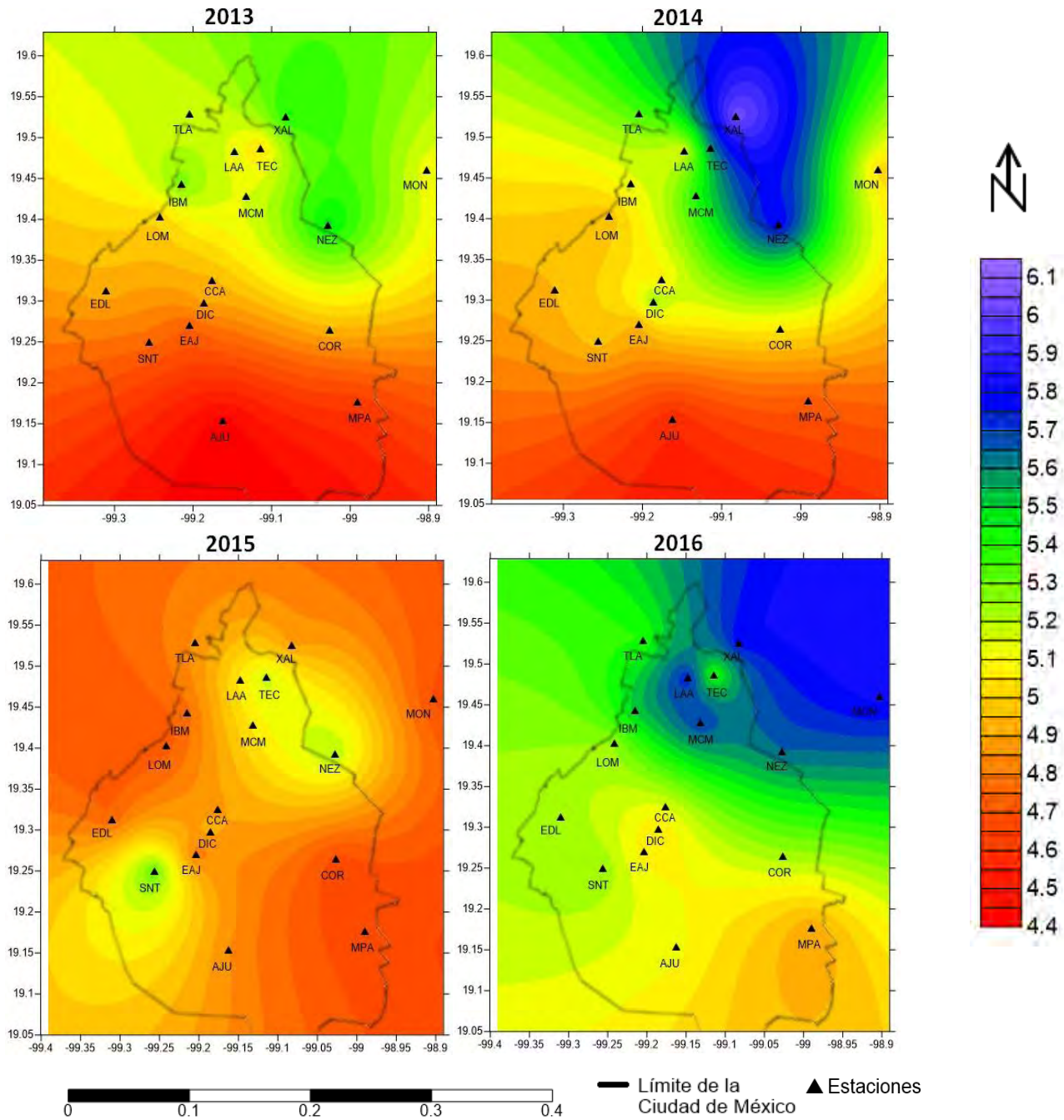


Figura 5.9 Distribución espacial del pH en la ZMCM para los años de estudio.

En lo que se refiere a la conductividad, la totalidad de los promedios ponderados anuales de las muestras para los cuatro años estudiados presentaron valores por debajo de 36 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 5.10), presentándose los valores más altos en el año 2015 cuyas muestras exhiben un alto contenido de sales, lo cual se debió a que este año fue el de menor precipitación en comparación con los demás años estudiados (véase Figura 5.1), lo que

posibilitó menos dilución de los iones y por ende un aumento en su concentración, lo cual se reflejó en un valor más alto de este parámetro.

Para los años 2013, 2015 y 2016 (Figura 5.10), la región de mayor valor de conductividad se encontró en el centro y norte del área de estudio, destacándose las estaciones de Legaria (IBM) y Nezahualcóyotl (NEZ) en estos años como la de mayores valores. En el año 2013, Legaria (IBM) presentó un promedio de conductividad de 24.10 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y Nezahualcóyotl (NEZ) de 23.64 $\mu\text{S}/\text{cm}$, en el año 2015 estas estaciones mostraron valores del orden de los 35.10 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 35.03 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente, mientras que en el año 2016 presentaron promedio de 25.48 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 27.19 $\mu\text{S}/\text{cm}$, tales niveles se asocian principalmente a la alta presencia de partículas provenientes de grandes extensiones de terreno con vegetación escasa y expuestos a la erosión del suelo que contribuyen al contenido de iones en el agua de lluvia, además de varias construcciones localizadas en esa región que también tienen gran aportación de iones a la precipitación. De manera general, la región de menor conductividad (16–19 $\mu\text{S}/\text{cm}$) se obtuvo en todos los sitios del sur de la ZMCM y la estación Montecillo (MON) en la zona noreste, sitios localizados en áreas caracterizadas por la presencia de una cubierta vegetal de tipo boscosa o cultivos, lejos de fuentes de contaminación antropogénicas, disminuyendo la probabilidad de que las especies iónicas se presenten en el agua de lluvia.

En el año 2014 se puede apreciar que la región con mayor valor de conductividad fue la del sureste, destacándose Ajusco (AJU) con un valor de 22.69 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mientras que la región con menor valor de conductividad del orden de los 15.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ fue la suroeste, específicamente en la estación Ex Convento Desierto de los Leones (EDL), además de esta zona en la estación de Montecillo (MON) ubicada en el noreste del área de estudio se obtuvo bajos valores de conductividad.

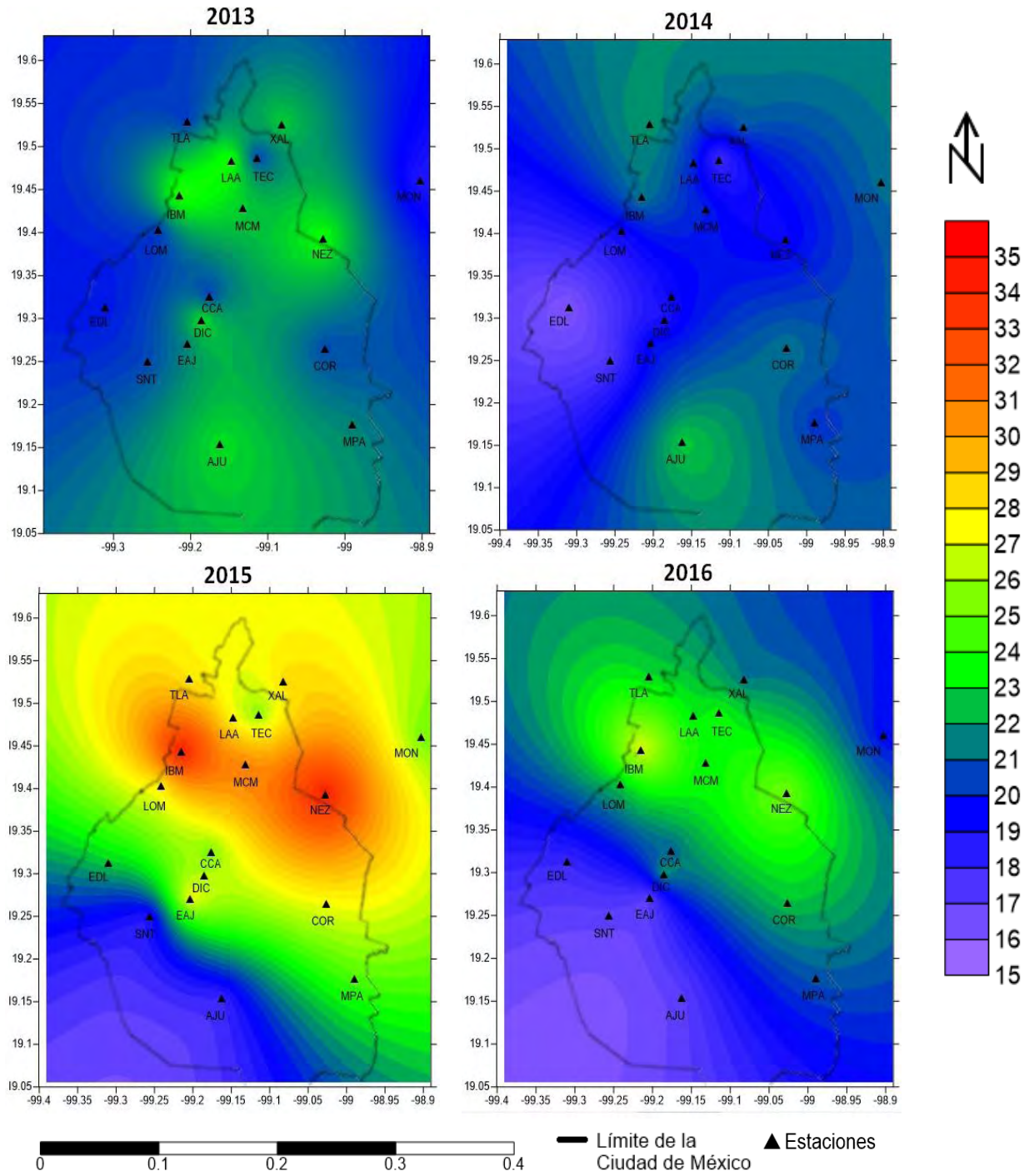


Figura 5.10 Distribución espacial y temporal de la conductividad eléctrica en la ZMCM.

5.3.2 Análisis espacial y temporal de los iones mayoritarios en las precipitaciones de la ZMCM

Los resultados del análisis de los aniones y cationes presentes en el agua de lluvia muestran (Figura 5.11) que el ion NH_4^+ fue el de mayor concentración en los años estudiados representando del 31 al 34% de los iones determinados con valores que oscilaron entre los 79.92 $\mu\text{Eq/L}$ y 98.04 $\mu\text{Eq/L}$, en segundo lugar se encuentra el ion SO_4^{2-} el cual representó del 24 al 26% del total con valores del orden de los 60.40 $\mu\text{Eq/L}$ y 82.47 $\mu\text{Eq/L}$ y en tercer lugar el ion NO_3^- representando del 15 al 17% con valores que oscilaron entre los 41.50 $\mu\text{Eq/L}$ y 51.81 $\mu\text{Eq/L}$. Mientras que los iones Ca^{2+} , Cl^- , H^+ , Na^+ , Mg^{2+} y K^+ presentaron del 13-15%, 3-7%, 2-4%, 2-3%, 1-2%, 1%, respectivamente, con valores que oscilaron entre 34.77-42.39 $\mu\text{Eq/L}$, 7.98-19.65 $\mu\text{Eq/L}$, 5.12-12.87 $\mu\text{Eq/L}$, 4.0-6.52 $\mu\text{Eq/L}$, 2.30-6.02 $\mu\text{Eq/L}$, 2.19-3.44 $\mu\text{Eq/L}$, respectivamente.

Como ya se explicó en capítulos anteriores el SO_4^{2-} , NO_3^- y Cl^- son iones que contribuyen a la acidez del agua de lluvia, mientras que el NH_4^+ y el Ca^{2+} son iones que participan en la neutralización del ácido sulfúrico y el ácido nítrico en la atmósfera. Por lo anterior entre mayor sea el contenido de NH_4^+ y Ca^{2+} , mayor será el pH del agua de lluvia.

Apoyándonos en la correlación realizada entre los iones (ver Figura 5.20) y en lo observado en la Figura 5.11 se puede apreciar la relación directa que existe entre el NH_4^+ y el SO_4^{2-} , lo que nos da a entender que los dos provienen de la misma fuente, lo mismo ocurre con el NO_3^- y el Ca^{2+} .

A continuación, se presenta la distribución espacial y temporal por estaciones de los iones precursores de lluvia ácida, SO_4^{2-} y NO_3^- además de la distribución del NH_4^+ por ser el de mayor concentración en nuestro período de estudio en la ZMCM. La relación de los demás iones está presente en el Anexo A.II, al igual que el promedio ponderado anual de pH y conductividad eléctrica de las muestras analizadas.

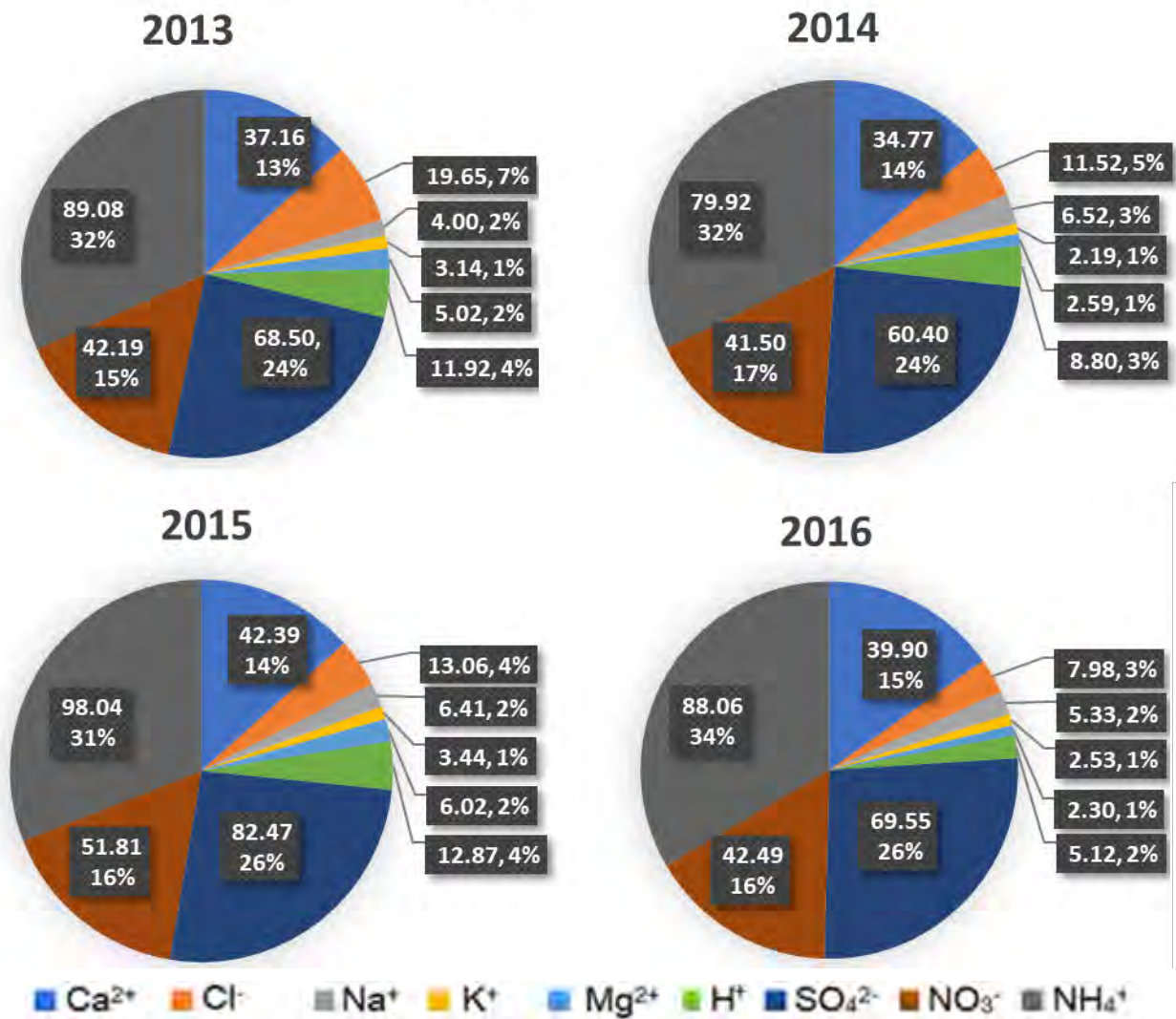


Figura 5.11 Abundancia en $\mu\text{Eq/L}$ de los iones analizados.

5.3.2.1 Concentraciones de SO_4^{2-} en $\mu\text{Eq/L}$ en la ZMCM

La Figura 5.12 muestra que la mayor concentración de SO_4^{2-} en la atmósfera está presente en el centro y norte de la ZMCM. Al mismo tiempo, se puede apreciar que el año 2014 fue el año con menor concentración de SO_4^{2-} en comparación con los demás años estudiados, debido principalmente a la precipitación, ya que el 2014 fue el año con mayor acumulado de lluvia respecto a los demás años analizados en este trabajo lo que permitió una mayor dilución de los iones y por lo tanto una menor concentración de los mismos. En el caso del 2015, al ser el año con menor acumulado de precipitación y por lo tanto tener menos por ciento de dilución de los iones, causó, entre otros factores como

el alto porcentaje de viento en calma, que fue el año con mayor concentración de SO_4^{2-} en la atmósfera.

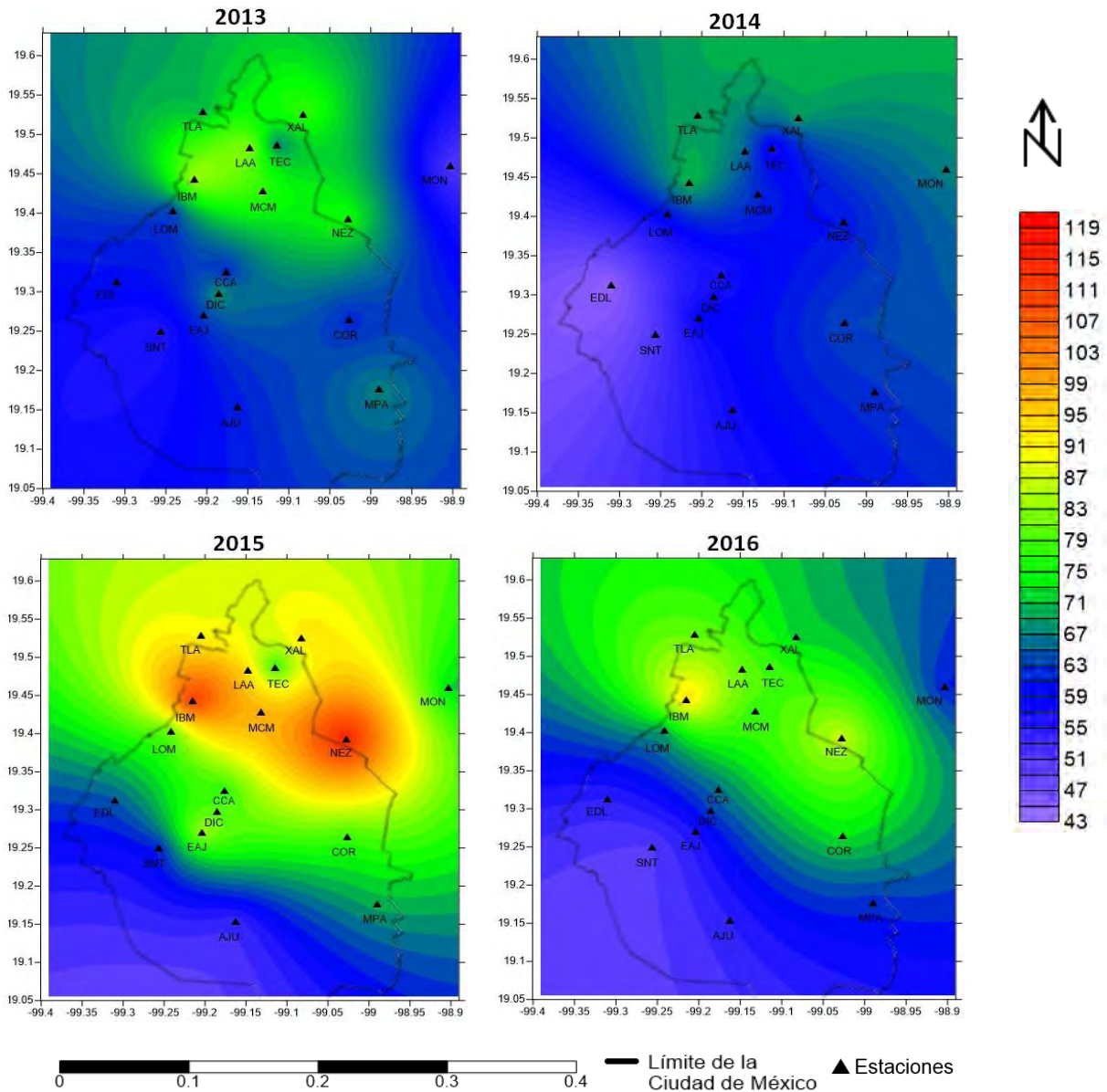


Figura 5.12 Distribución espacial y temporal de SO_4^{2-} en $\mu Eq/L$ en la ZMCM.

De manera general se puede apreciar en la Figura 5.12 que los promedios ponderados anuales de SO_4^{2-} oscilaron entre los 43 $\mu Eq/L$ y 115.91 $\mu Eq/L$, además, se puede observar que la estación Legaria (IBM) presentó en los años 2013, 2014 y 2016, los mayores promedios ponderados anuales de SO_4^{2-} con valores que oscilaron entre los 70.24 y 93.26 $\mu Eq/L$ seguida por las estaciones Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA) en el año 2013,

Tlalnepantla (TLA) en el año 2014 y Nezahualcóyotl (NEZ) en el año 2016, con valores del orden de los 82.07 $\mu\text{Eq/L}$, 68.94 $\mu\text{Eq/L}$ y 86.67 $\mu\text{Eq/L}$, respectivamente. En el caso del año 2015, la estación de mayor promedio ponderado fue Nezahualcóyotl (NEZ) ostentando valores de 115.91 $\mu\text{Eq/L}$ seguida por la estación Legaria (IBM) con valores del orden de los 111.32 $\mu\text{Eq/L}$. Las estaciones con menores promedios ponderados anuales de SO_4^{2-} fueron generalmente las ubicadas al suroeste de la ZMCM, destacándose la estación Ex Convento Desierto de los Leones (EDL) por registrar el valor promedio ponderado más bajo en el período analizado, aproximadamente 44.39 $\mu\text{Eq/L}$.

Cabe destacar que las concentraciones del ion SO_4^{2-} tienen este comportamiento de máximas concentraciones en el norte y menos en la región sur ya que las mismas se ven afectadas directamente por la alta densidad industrial en la zona norte, conjuntamente, a la afectación provocada por las emisiones de SO_2 del volcán Popocatepetl, mientras que en el sur de la ZMCM hay pocas industrias y el flujo vehicular es mínimo por lo que hay menos emisiones de contaminantes. Además, en el caso específico del 2015 el volcán Popocatepetl contribuyó grandemente en el aumento de las concentraciones de SO_4^{2-} en nuestra área de estudio, en la Figura 5.13 se ejemplifica lo anterior expuesto. La Figura 5.13 muestra los flujos medios anuales de SO_2 (línea negra continua), flujo medio de SO_2 en 2015 (marcado con punto rojo), línea de tendencia de regresión lineal (línea naranja discontinua), flujo medio descendente de SO_2 (línea roja horizontal), ± 1 desviación estándar de la media decenal del flujo de SO_2 (banda gris) (Carn et al., 2017).

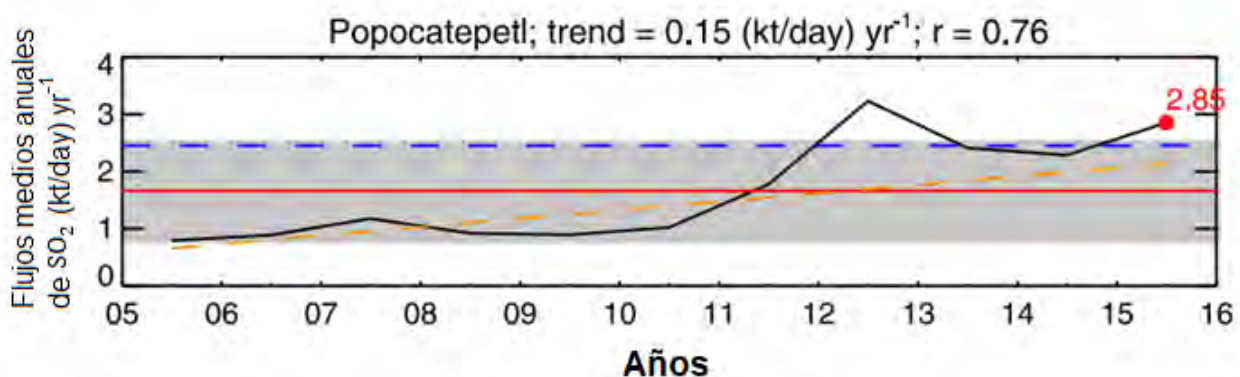


Figura 5.13 Flujos medios anuales de SO_2 del volcán Popocatepetl.

(Fuente: Carn et al., 2017)

5.3.2.2 Concentraciones de NO_3^- en $\mu\text{Eq/L}$ en la ZMCM

El ion NO_3^- presentó un comportamiento similar al ion SO_4^{2-} mostrándose las mayores concentraciones al norte y centro de la ZMCM y las menores al sur. Igualmente, el año 2015 presentó las máximas concentraciones y el año 2014 las menores concentraciones de este ion en la ZMCM (Figura 5.14), este comportamiento se debió a las mismas condiciones explicadas en el apartado anterior sobre el acumulado de lluvia durante los años analizados en este trabajo, que posibilitó la dilución de los iones un año más que otro y por lo tanto una menor o mayor concentración de NO_3^- en la atmósfera.

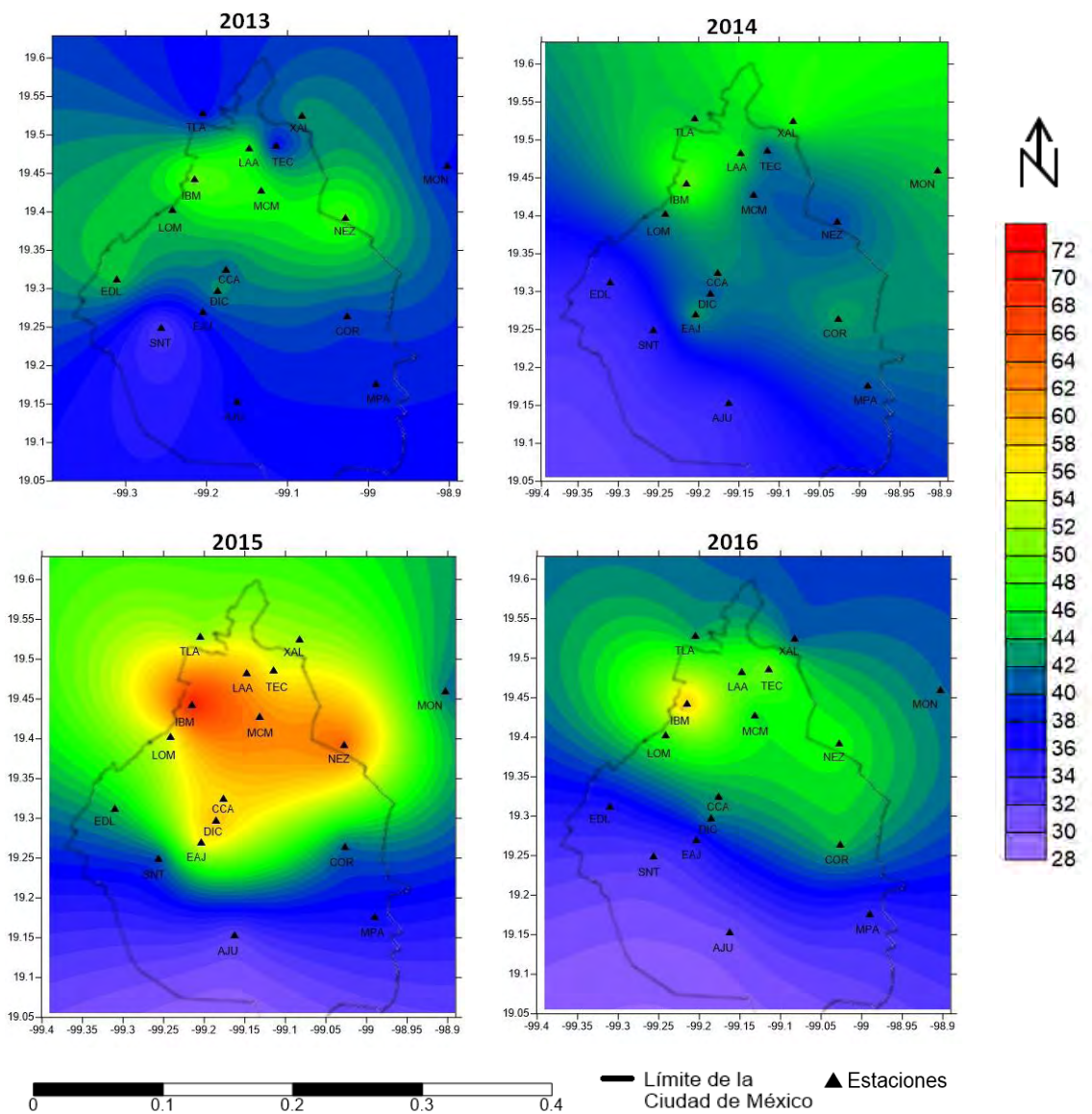


Figura 5.14 Distribución espacial y temporal del anión NO_3^- en $\mu\text{Eq/L}$ en la ZMCM.

En la Figura 5.14 se puede apreciar como los promedios ponderados anuales de concentración de NO_3^- oscilaron entre los 28 $\mu\text{Eq/L}$ y 71.31 $\mu\text{Eq/L}$, destacándose la estación Legaria (IBM) como la de máximos promedios ponderados anuales de este ion durante todos los años analizados con valores que oscilaron entre 49.27 $\mu\text{Eq/L}$ y 71.31 $\mu\text{Eq/L}$ y las estaciones de menores promedios ponderados anuales las ubicadas al suroeste, recalcando a San Nicolás Totolapan (SNT) en el año 2013 con valores aproximados de 32.74 $\mu\text{Eq/L}$ y a la estación Ajusco (AJU) en los años 2014, 2015 y 2016 con valores del orden de los 33.97 $\mu\text{Eq/L}$, 32.98 $\mu\text{Eq/L}$ y 31.02 $\mu\text{Eq/L}$, respectivamente.

El comportamiento del NO_3^- en la ZMCM es explicado por la presencia del alto flujo vehicular en el centro de la ciudad en donde se emiten grandes cantidades de precursores como los NO_x además de lo aportado por la zona industrial ubicada al norte de la ciudad.

5.3.2.3 Concentraciones del ion NH_4^+ en $\mu\text{Eq/L}$ en la ZMCM

Como se puede observar en la Figura 5.15 las máximas concentraciones del ion NH_4^+ se encuentran en la región norte y centro de la ZMCM. Los promedios ponderados anuales de concentraciones se encontraron en el rango de los 46 $\mu\text{Eq/L}$ y los 155.30 $\mu\text{Eq/L}$, además, en cuanto abundancia por año, el NH_4^+ presentó el mismo comportamiento que los aniones NO_3^- y SO_4^{2-} . Lo expuesto anteriormente unido con su capacidad neutralizante de compuestos acidificantes en la atmósfera nos da una idea de por qué en las regiones al norte y centro de la ZMCM se encuentren pH más alcalinos que los encontrados al sur de nuestra área de estudio.

La estación que registró mayor concentración de NH_4^+ (Figura 5.15) en los años 2014, 2015 y 2016 fue Nezahualcóyotl (NEZ) con promedios ponderados anuales que oscilaron entre los 94.40 $\mu\text{Eq/L}$ y 155.30 $\mu\text{Eq/L}$, mientras que en el año 2013 fue la estación Legaria (IBM) con un promedio ponderado anual de 104.96 $\mu\text{Eq/L}$. Mientras que las estaciones con menores promedios ponderados anuales se encontraron al sur de la ZMCM, destacándose el menor valor promedio ponderado anual en la estación Ex Convento Desierto de los Leones (EDL) en el 2014 con valor aproximado de 53.49 $\mu\text{Eq/L}$.

Este comportamiento puede deberse, en parte, a que algunas de las fuentes principales de NH_4^+ son la descomposición de la materia orgánica proveniente de la ganadería, las actividades agrícolas que incorporan fertilizantes al suelo, industrias de elaboración de alimentos y el tráfico vehicular que es característico de la zona donde se encontraron los máximos de este ion.

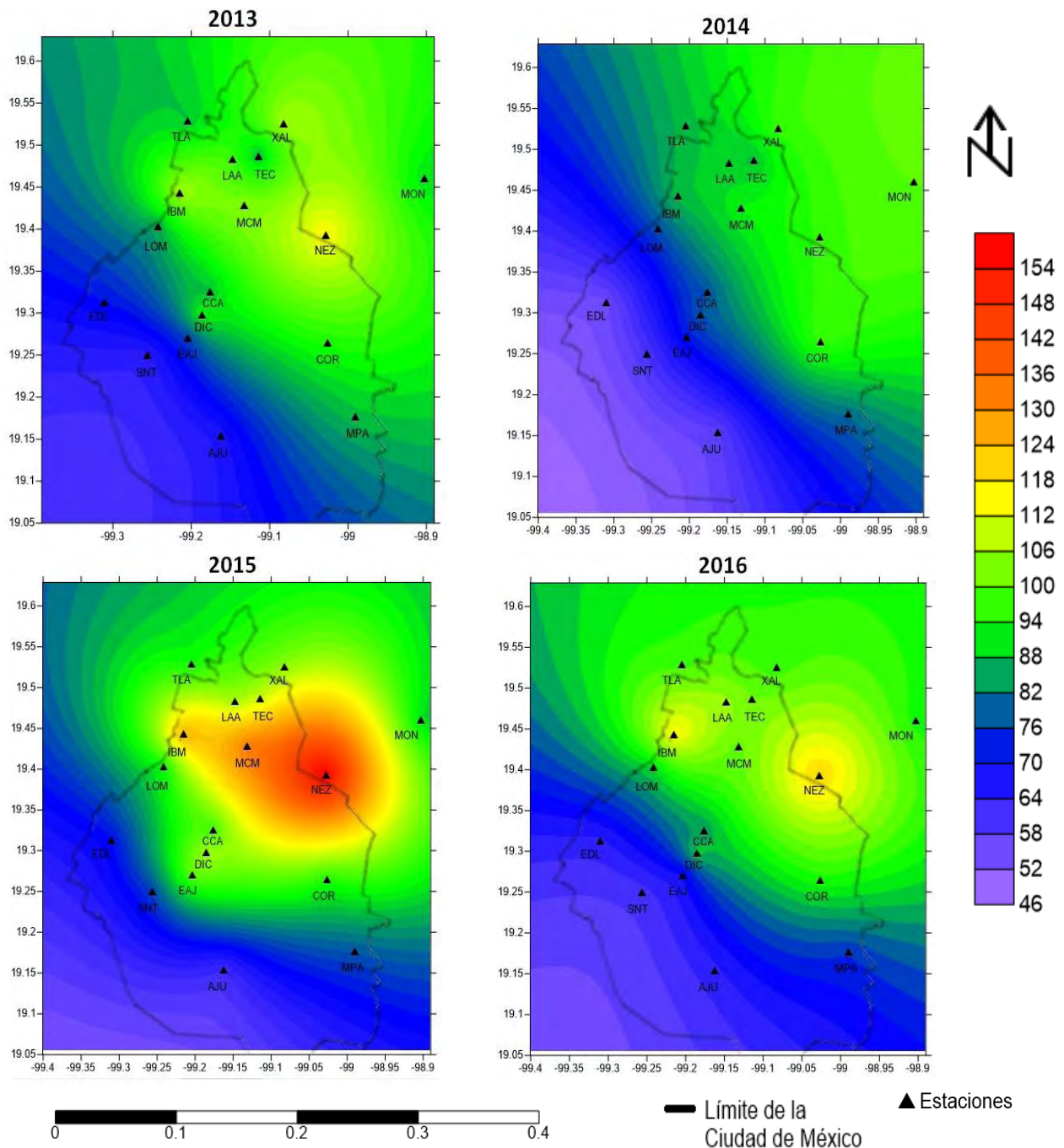


Figura 5.15 Distribución espacial y temporal del ion NH_4^+ en $\mu\text{Eq/L}$ en la ZMCM.

5.3.3 Análisis espacial y temporal del depósito atmosférico húmedo

El depósito atmosférico húmedo fue calculado multiplicando la concentración de cada ion por su valor de precipitación correspondiente, dichos valores fueron expresados en kg/ha. Los resultados del análisis de las muestras de lluvia manifiestan (Figura 5.16) que el ion SO_4^{2-} fue el de mayor acumulado promedio anual de depósito en los años estudiados, representando del 35 al 38 % del total con valores acumulados promedios que oscilaron entre los 25.24 kg/ha y 29.17 kg/ha, en segundo lugar se encuentra el ion NO_3^- el cual representó del 28 al 31% del total con valores acumulados promedios entre los 20.07 kg/ha y 26.06 kg/ha y en tercer lugar el ion NH_4^+ representando del 16 al 18% con valores que oscilaron entre los 11.83 kg/ha y 14.21 kg/ha.

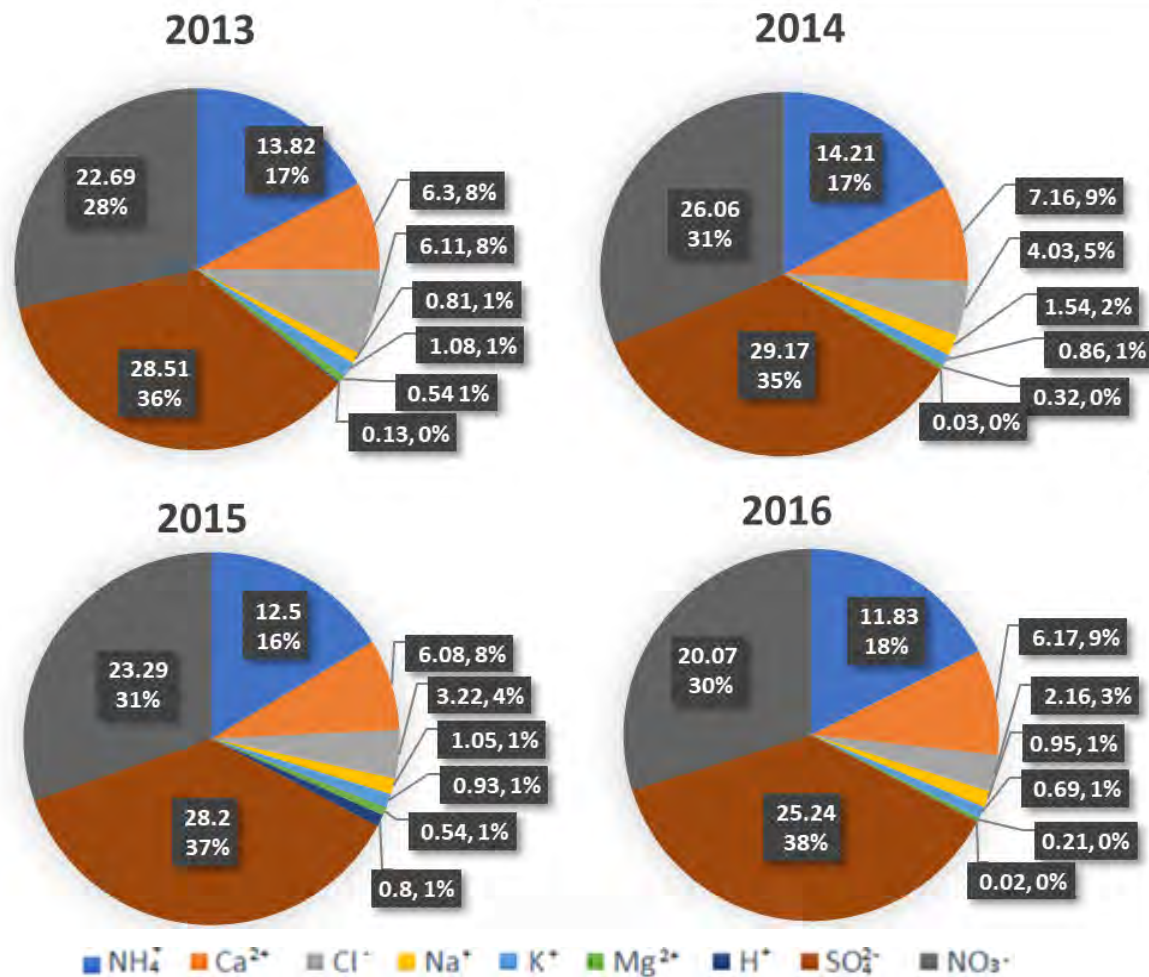


Figura 5.16 Promedios anuales del depósito acumulado para cada ion analizado en kg/ha.

Le siguen en orden decreciente (Figura 5.16) los iones Ca^{2+} y Cl^- , los que presentaron del total de depósito anual del 8 al 9% y del 3 al 8%, con valores acumulados promedios que oscilaron entre los 6.08 - 7.16 kg/ha y 2.16 - 6.11 kg/ha, respectivamente. Mientras que los iones Na^+ , Mg^{2+} , K^+ y H^+ presentaron del 0-2% de los valores de depósito anual, con valores que oscilaron entre los 0.02 kg/ha y los 1.54 kg/ha. Hay que destacar que estos iones contribuyeron con bajos porcentos al depósito húmedo anual en la ZMCM debido a las bajas concentraciones de los mismos, la cual fue explicada en el apartado anterior.

El año 2014 fue el de mayor porcentaje de iones depositados, debido principalmente a ser el año de mayor acumulado de precipitación en comparación con los demás estudiados. Mientras que el año 2016 fue el de menores porcentos de depósito acumulado, destacar que, aunque este año fue el tercer año donde más acumulado de precipitación hubo, fue el año de menor concentración de iones, por ende, menos kg/ha de iones depositados en la ZMCM.

A continuación, se presenta la distribución espacial y temporal por estaciones de los iones de mayor contribución al depósito atmosférico húmedo en la ZMCM: SO_4^{2-} , NO_3^- y NH_4^+ . La relación de los demás iones está presente en el Anexo A.III.

5.3.4.1 Depósito de los iones SO_4^{2-} , NO_3^- y NH_4^+ en kg/ha en la ZMCM

En la Figura 5.17 se puede observar el comportamiento del depósito de SO_4^{2-} en cada una de las estaciones de muestreo para los años estudiados. De acuerdo con estos resultados se observa que la región oeste fue la que presentó mayores acumulados promedios de este ion destacándose la estación Legaria (IBM) como la de mayor valor de acumulado anual de SO_4^{2-} en los años 2014 y 2015 con valores del orden de los 47.28 kg/ha y 41.94 kg/ha, respectivamente, mientras que en los años 2013 y 2016, la estación que mostró mayor acumulado fue Ex Convento Desierto de los Leones (EDL) con valores del orden de los 39.89 kg/ha y los 33.12 kg/ha. Los mínimos se encontraron en la parte este de nuestra área de estudio, específicamente en las estaciones Montecillo (MON) en el año 2013 (12.18 kg/ha), Corena (COR) en los años 2014 y 2015 (15.41 kg/ha y 16.41 kg/ha, respectivamente) y Milpa Alta (MPA) en el año 2016 (9.63 kg/ha).

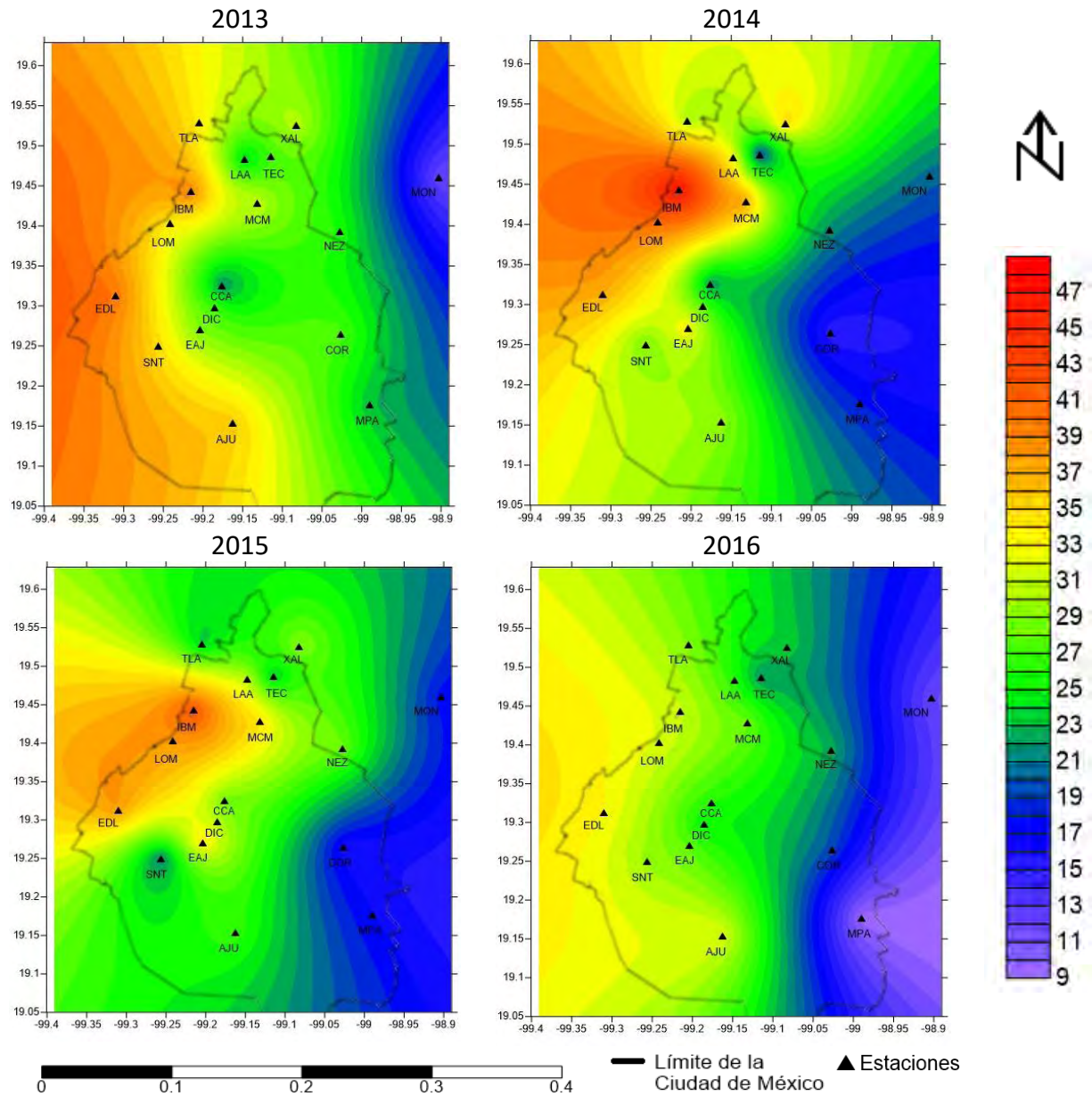


Figura 5.17 Distribución espacial y temporal del depósito de SO_4^{2-} en kg/ha en la ZMCM.

Cómo se puede observar en la Figura 5.18 el ion NO_3^- presentó un comportamiento similar al ion SO_4^{2-} , siendo la región del oeste la que presentó los mayores acumulados promedios anuales y la región del este la de menores promedios acumulados anuales. Las estaciones con mayores valores de depósito acumulado de NO_3^- en el período estudiado fueron Lomas (LOM) en los años 2013 y 2016 con valores de 30.78 kg/ha y 28.54 kg/ha , respectivamente y la estación Legaria (IBM) en los años 2014 y 2015 con valores de 42.83 kg/ha y 34.70 kg/ha , respectivamente. Mientras que las estaciones con

los mínimos de depósito de NO_3^- fueron Montecillo (MON) en el año 2013 (11.71 kg/ha), Corena (COR) en los años 2014 y 2015 (15.78 kg/ha y 11.13 kg/ha, respectivamente) y Milpa Alta (MPA) en el año 2016 (6.91 kg/ha).

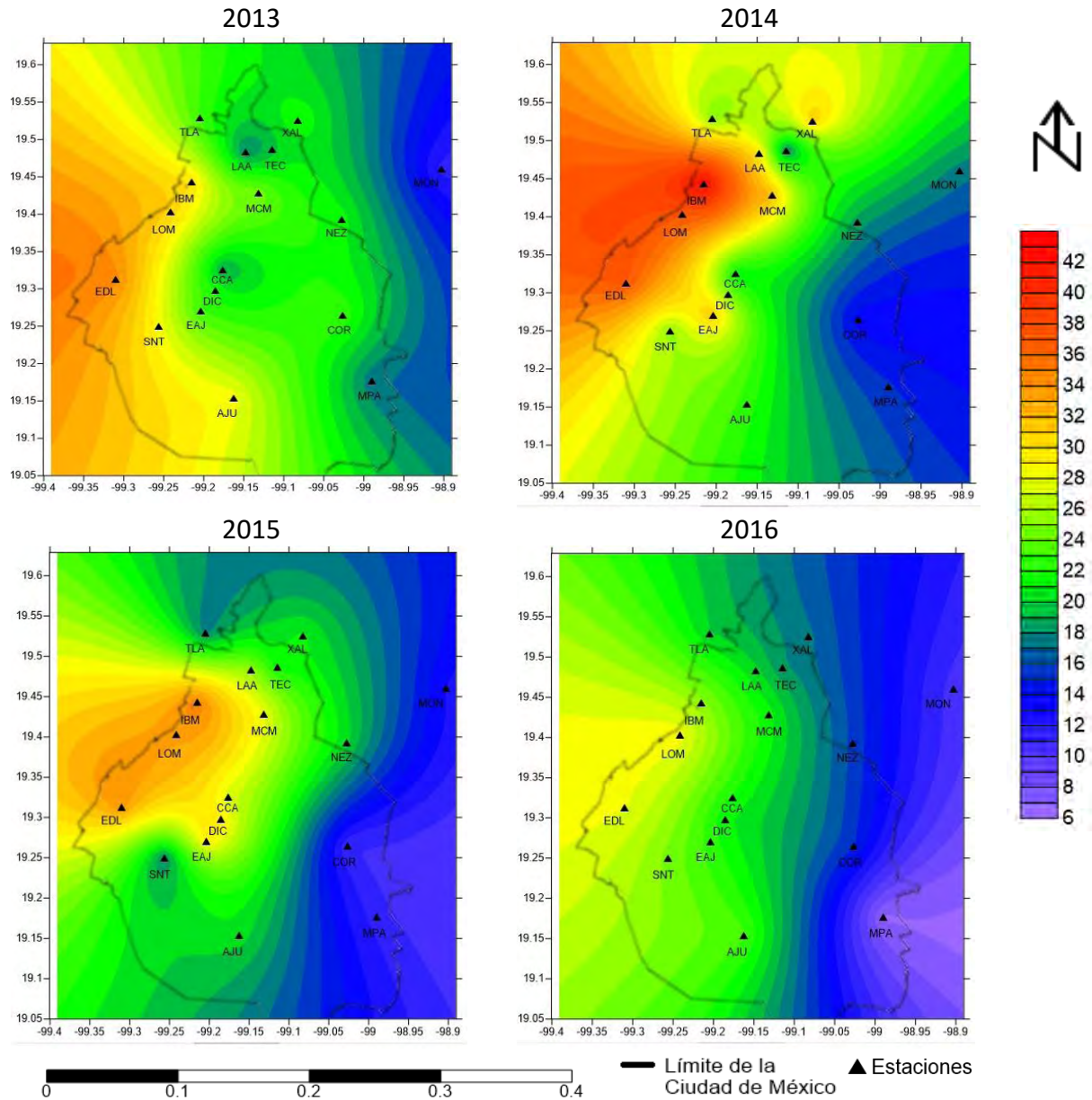


Figura 5.18. Distribución espacial y temporal del depósito de NO_3^- en kg/ha en la ZMCM.

En cuanto al ion NH_4^+ (Figura 5.19), presentó el mismo comportamiento que los iones SO_4^{2-} y NO_3^- en cuanto a las regiones de máximos y mínimos acumulados de depósito (oeste de mayores y este el de menores acumulados de depósito). La estación Legaria (IBM) mostró los mayores acumulados en los años 2013, 2014 y 2015 (18.25 kg/ha, 21.46

kg/ha, 17.36 kg/ha), mientras que el año 2016 la estación Lomas (LOM) fue la que registró mayor acumulado de depósito de NH_4^+ (15.17 kg/ha). Las estaciones que registraron los menores valores de acumulado anual de depósito de NH_4^+ fueron Montecillo (MON) en los años 2013 y 2016 con valores de 7.91 kg/ha y 6.92 kg/ha, respectivamente y la estación de Milpa Alta (MPA) en los años 2014 y 2015 con valores de 8.61 kg/ha y 6.97 kg/ha, respectivamente.

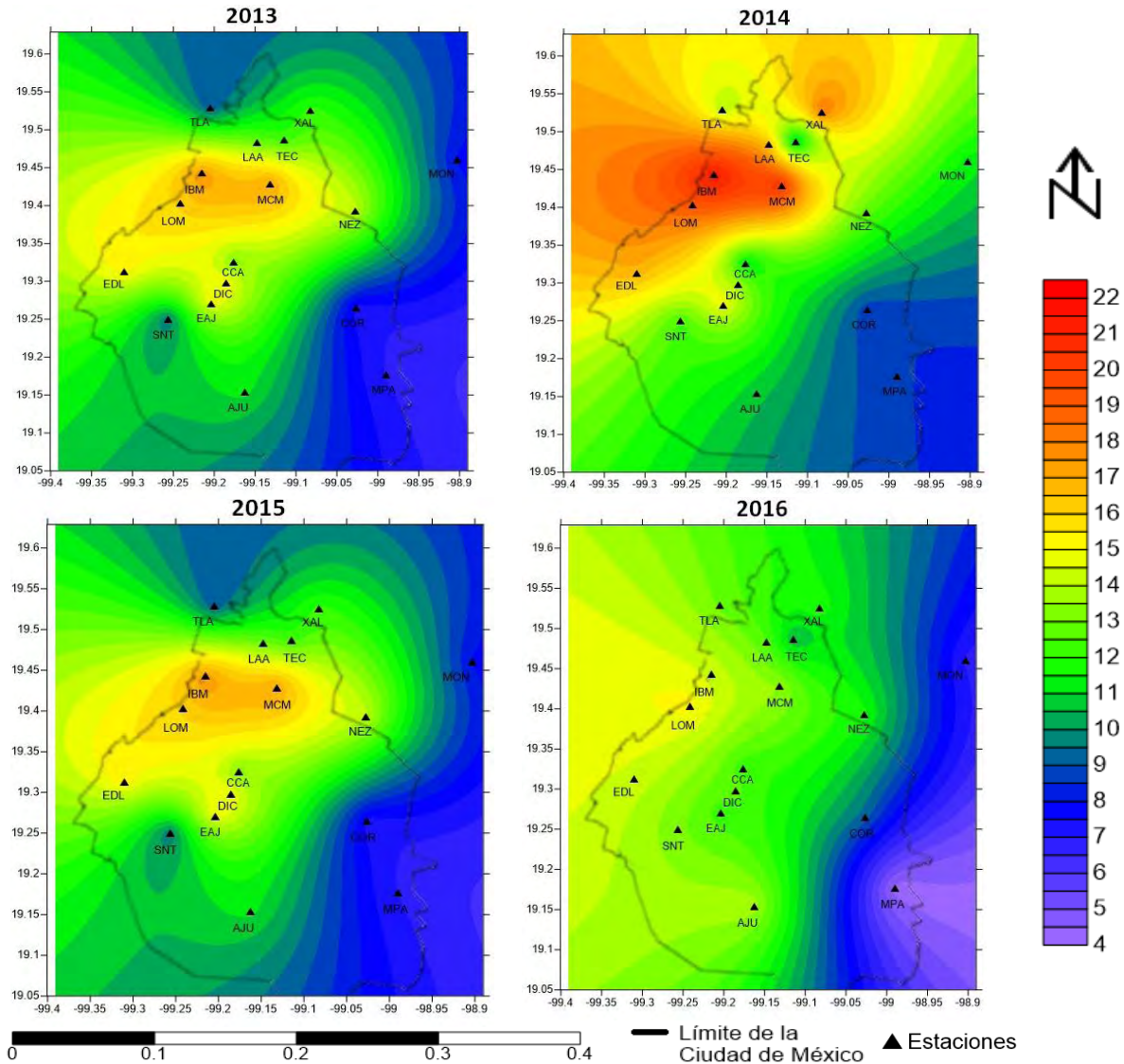


Figura 5.19 Distribución espacial y temporal del depósito de NH_4^+ en kg/ha en la ZMCM.

Nótese que el ion NH_4^+ fue el de mayor concentración en $\mu\text{Eq/L}$ mientras que fue el tercer ion en cuanto al acumulado promedio anual del depósito en la ZMCM, esto se debió principalmente a que en las zonas donde se encuentran las máximas concentraciones de

este ion, no se encuentran los máximos acumulados de precipitación lo que contribuye a que este ion no se deposite en mayores cantidades.

Además, como se observó anteriormente, la región oeste de nuestra área de estudio presentó los mayores valores promedios acumulados de depósito de las especies analizadas, debido principalmente a la mayor presencia de eventos de precipitación característicos de esta área en comparación con las demás regiones de la ZMCM, en la Figura 5.7 se puede observar cómo las estaciones ubicadas en esta región presentaron mayores acumulados de precipitación anual, mientras que las ubicadas al este los menores acumulados de precipitación.

5.4 Relación entre las variables meteorológicas y los iones presentes en la lluvia

La relación entre las variables meteorológicas y los iones de lluvia abordados en este trabajo, se estableció utilizando la información meteorológica disponible en la página web del SIMAT correspondiente a la REDMET (<http://www.aire.cdmx.gob.mx>), las muestras de lluvia colectadas por la REDDA y su posterior análisis por la SCA-CCA-UNAM para los años desde 2013 a 2016.

La REDMET está integrada por 26 estaciones meteorológicas mientras que la REDDA está conformada por 16 estaciones de muestreo de depósito atmosférico húmedo. Como el objetivo de este apartado era determinar la relación entre las variables meteorológicas y las especies químicas de la lluvia, tuvimos que establecer cuales estaciones de la REDDA tenían datos de variables meteorológicas, lo que nos mostró que solamente 7 estaciones de la REDDA coincidían con las estaciones de la REDMET. Sabiendo esto, se determinó mediante la creación de un software en el lenguaje de programación C# las variables meteorológicas en las estaciones que faltaban, mediante la interpolación de los valores meteorológicos medidos por las estaciones más cercanas a las estaciones de la REDDA, que no tuvieran estas variables.

Con la base de datos completa, se procedió a realizar la correlación entre los iones de la lluvia y las variables meteorológicas, mediante el método de Spearman, primeramente, de manera general para la ZMCM y después para cada una de las estaciones de muestreo. Dichos resultados se muestran a continuación.

Como se puede observar en la parte derecha de la Figura 5.20, la cual muestra la correlación de los iones y las variables meteorológicas en la ZMCM, el dendrograma reveló que hay dos grupos principales correlacionados en los datos, el primer grupo está conformado por el ion H^+ , la precipitación (PP) y la humedad relativa (HR), mientras que el segundo grupo está conformado por la velocidad del viento (WSP), temperatura (TMP) y los iones NO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ , Ca^{2+} , Cl^- , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} . Dentro del primer grupo, se puede observar una subdivisión que muestra una gran relación entre la PP y la HR y como esta influye grandemente sobre el ion hidronio (H^+). En el caso del segundo grupo se muestra cómo la TMP y la WSP influyen directamente sobre los iones de la lluvia, los cuales se encuentran distribuidos en dos grupos el primero por los iones NO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ , Ca^{2+} y el segundo grupo por los iones restantes Cl^- , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} .

Todos los iones presentaron buena correlación entre sí (Figura 5.20), obteniéndose la mayor correlación para los iones NO_3^- y SO_4^{2-} con el ion NH_4^+ de $r= 82$ y $r=77$, respectivamente, este valor de correlación nos indica que en el depósito atmosférico húmedo la formación del NH_4^+ fue producto de la neutralización de los H^+ , provocando el incremento de NO_3^- y SO_4^{2-} . También destacar el papel que juega el Ca^{2+} , ya que, igualmente presentó una gran correlación con el SO_4^{2-} y el NO_3^- lo que demuestra que este ion también actuó como neutralizante del H_2SO_4 y el HNO_3 .

Para determinar la relación del pH con los iones presentes en las muestras de lluvia, primero hay que recordar que el pH es el logaritmo con signo negativo de la concentración del ion H^+ por lo que las correlaciones presentadas en la Figura 5.20 de los iones de la lluvia y las variables meteorológicas con el ion H^+ serán las mismas que las del pH, pero con el signo opuesto. Sabiendo lo anterior se puede observar en la Figura 5.20 que el pH de la lluvia tuvo una correlación de baja a moderada negativa con los aniones Cl^- , NO_3^- y SO_4^{2-} de $r=-17$, $r=-4$ y $r=-20$, respectivamente, destacar que todas estas correlaciones son estadísticamente significativas ya que el p valor en todos los casos, estuvo por debajo del nivel de significancia 0.05. Como se pudo apreciar anteriormente el SO_4^{2-} presentó la mayor correlación negativa con el pH, lo que indica la posibilidad de que el H_2SO_4 fuese el principal compuesto causante de la acidez en las muestras de agua de lluvia, mientras que el HNO_3 no contribuyó de manera tan significativa en la acidificación del agua de

lluvia, ya que presentó una correlación baja con el pH. Mientras que con los cationes NH_4^+ , Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , el pH presentó una correlación de baja a moderada positiva, destacándose el ion Ca^{2+} con la mayor correlación de $r=38$ con el pH, por lo que este ion fue el que más contribuyó a la neutralización de los compuestos ácidos presentes en la lluvia en nuestro período de estudio.

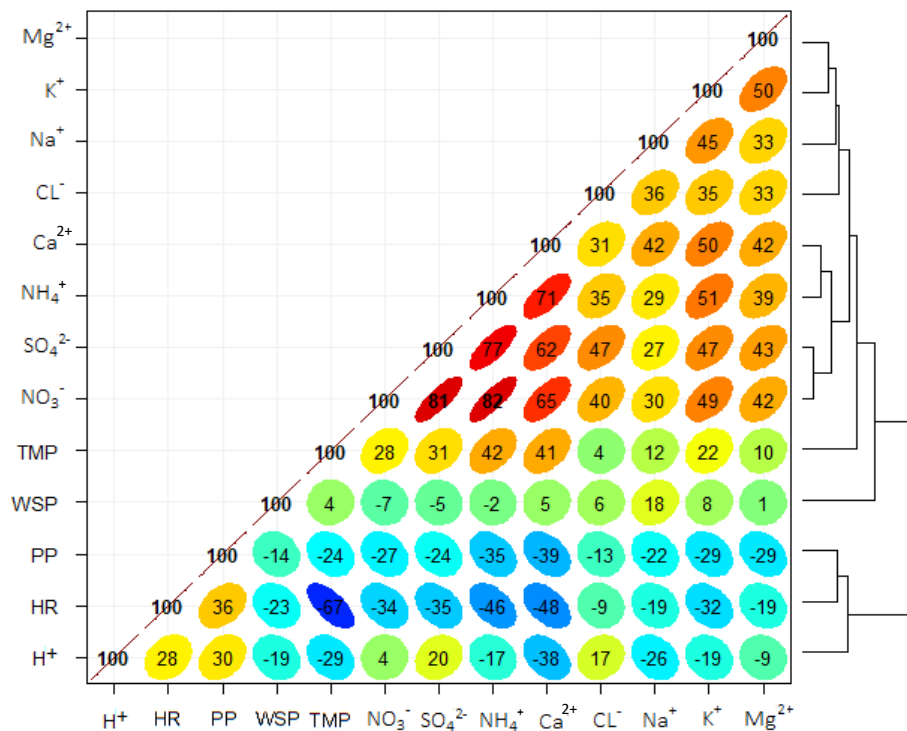


Figura 5.20 Correlación de Spearman entre las variables meteorológicas y los iones de lluvia para la ZMCM 2013-2016.

La relación entre las variables meteorológicas seleccionadas y las especies químicas analizadas en este estudio, se muestran en los apartados siguientes donde se abordan de forma individual.

Debido a la amplitud de los datos únicamente se muestra la relación de la temperatura, la velocidad del viento, la humedad relativa y la precipitación con los iones SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ y H^+ . Se seleccionaron estos iones debido a que los iones SO_4^{2-} y NO_3^- son precursores de la lluvia ácida, el ion NH_4^+ fue el que presentó mayor concentración en nuestra área de estudio, además su formación disminuye la acidez en las precipitaciones y el ion H^+ nos muestra el comportamiento del pH de la lluvia. En el Anexo A.IV. se

muestran cada una de las correlaciones por estaciones de las variables meteorológicas con los demás iones analizados.

5.4.1 Correlación entre la precipitación y los iones H^+ , NH_4^+ , NO_3^- y SO_4^{2-}

La Figura 5.21 muestra la correlación de la precipitación con los iones H^+ , NH_4^+ , NO_3^- y SO_4^{2-} por estaciones de muestreo. De forma general se puede observar cómo la precipitación tiene una correlación de baja a moderada negativa con los iones NH_4^+ , NO_3^- y SO_4^{2-} , lo que nos da a entender que a mayor precipitación menor concentración de NH_4^+ , SO_4^{2-} y NO_3^- , lo cual ocurre porque al aumentar la precipitación aumenta la dilución de estos iones y por ende disminuye su concentración. Así mismo se puede ver como la mayor correlación negativa es en aquellas estaciones donde se presentan los mayores acumulados de precipitación durante la temporada de lluvias en los años estudiados, destacándose la estación San Nicolás Totolapan (SNT) ubicada al suroeste de la ZMCM por ser la de mayor correlación entre la precipitación y los iones NO_3^- y SO_4^{2-} de $r=-55$ y $r=-59$, respectivamente y la estación Legaria (IBM) por tener la mayor correlación entre el ion NH_4^+ y la precipitación de $r=-56$. Por otro lado, la región de menor correlación negativa fue la encontrada en el este de la ZMCM donde se obtuvo menores acumulados de precipitación anual, mostrándose en los casos de los iones NH_4^+ y NO_3^- , la estación Centro de Ciencias de la Atmosfera (CCA) como la de menor correlación negativa con la precipitación de $r=-15$ y $r=-6$, respectivamente, mientras que en el caso del ion SO_4^{2-} la estación Xalostoc (XAL) con $r=-6$ fue la que presentó menor valor de correlación negativa con esta variable.

Como se puede apreciar en la Figura 5.21 el ion H^+ presenta una correlación de baja a moderada positiva con la precipitación, por lo que en el caso del pH de la lluvia éste va a presentar una correlación de baja a moderada negativa, es decir, a mayor precipitación menor valor de pH y por lo tanto mayor acidez en las precipitaciones.

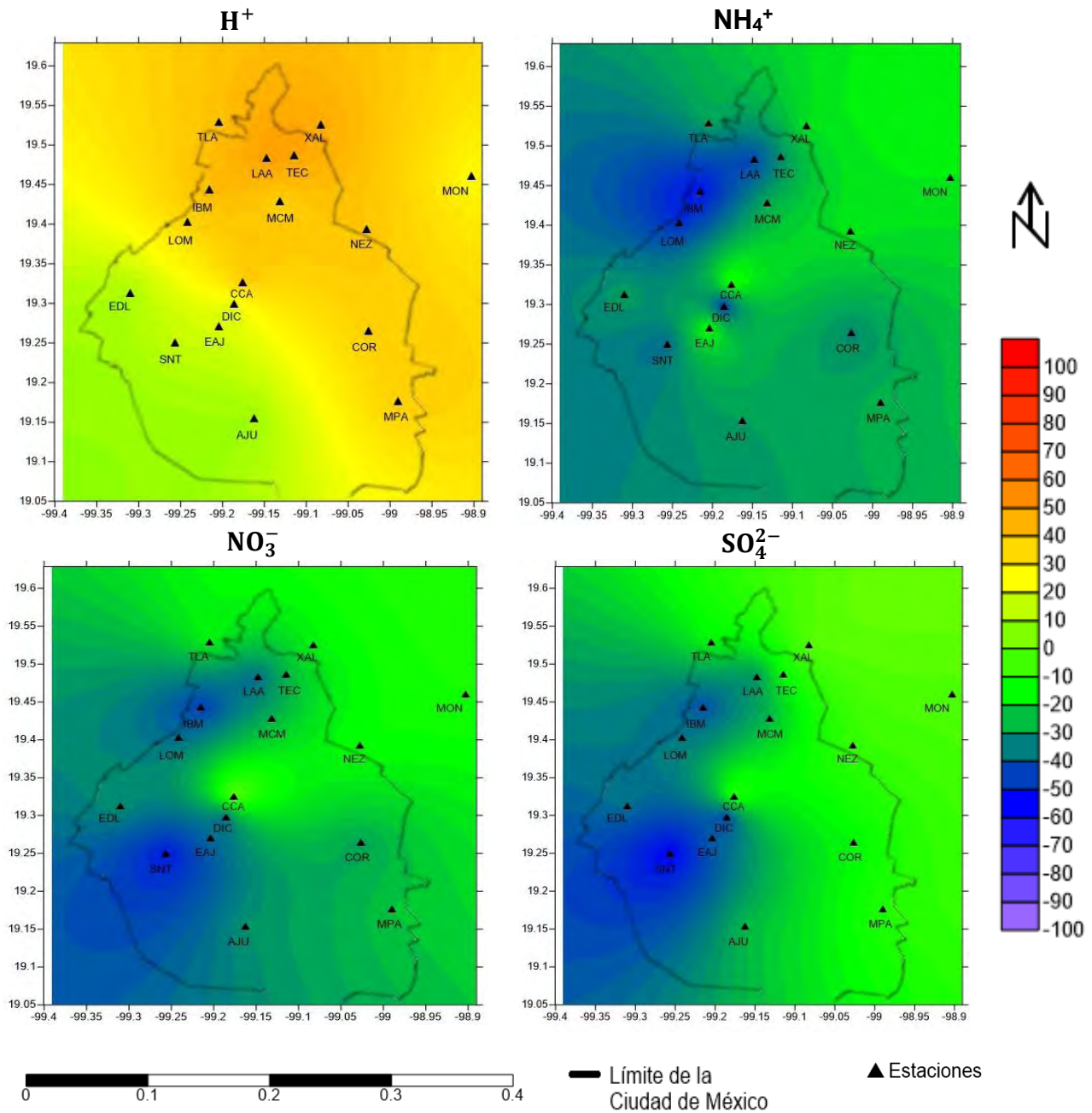


Figura 5.21 Correlación de Spearman entre la precipitación y los iones H^+ , NH_4^+ , NO_3^- y SO_4^{2-} para la ZMCM 2013-2016.

En la Figura 5.21 se observa como en las regiones del centro y norte de la ZMCM se encuentran los valores de mayor correlación positiva entre el H^+ y la precipitación y por lo tanto los mayores valores de correlación negativa entre el pH y la precipitación, destacándose la estación Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA) como la mayor correlación negativa de $r=-46$ entre el pH y la precipitación, mientras que las estaciones

ubicadas en la parte suroeste de la ZMCM fueron las de menor correlación negativa entre el pH y la precipitación, siendo la estación Ajusco (AJU) con $r=-6$ la que presentó la correlación negativa más baja, lo que nos da la idea que en esta estación otras variables influyen más en la acidificación de la lluvia, variables que pueden ser la velocidad y dirección del viento, las cuales traen los contaminantes desde las regiones más al norte de la ZMCM hasta esta región.

5.4.2 Correlación entre la temperatura y los iones H^+ , NH_4^+ , NO_3^- y SO_4^{2-}

En la Figura 5.22 se puede observar la correlación de la temperatura con los iones H^+ , NH_4^+ , NO_3^- y SO_4^{2-} por estaciones de muestreo.

Se puede apreciar cómo la temperatura tiene una correlación de baja a moderada positiva con los iones NH_4^+ , NO_3^- y SO_4^{2-} , lo que nos da a entender que a mayor temperatura mayor concentración de NH_4^+ , NO_3^- y SO_4^{2-} , lo cual ocurre porque al aumentar la temperatura incrementa las reacciones en las fases gaseosa y acuosa, con lo cual más contaminantes en estado gaseoso se convierten en iones, potenciando las concentraciones en las precipitaciones de los mismos.

La mayor correlación positiva fue en aquellas estaciones ubicadas en la parte norte y centro de nuestra área de estudio donde se presentan los mayores valores de temperatura provocadas en mayor parte por el fenómeno de isla de calor. En el caso de los iones NH_4^+ y SO_4^{2-} , la estación que presentó la mayor correlación positiva con la temperatura fue Diconsa (DIC) con valores de $r=43$ y $r=40$, respectivamente, en el caso del ion NO_3^- la estación con mayor correlación positiva con la temperatura fue Corena (COR) con un valor de $r=37$. Mientras que, las estaciones que presentaron menores valores de correlación positiva con la temperatura fueron, Ajusco (AJU) para el ion amonio (NH_4^+) con $r=16$ y Nezahualcóyotl (NEZ) para los iones NO_3^- y SO_4^{2-} con $r=17$ y $r=9$, respectivamente.

El ion H^+ , como se puede apreciar en la Figura 5.22, presentó una correlación de baja a moderada negativa con la temperatura, en todas las estaciones de muestro, excepto en la estación Ajusco (AJU) donde se presentó una correlación baja positiva con la temperatura, por lo que el pH presentó un comportamiento inverso al H^+ , es decir a mayor

temperatura, mayor valor de pH en toda la ZMCM, menos en Ajusco (AJU) donde a mayor temperatura, menor valor de pH.

Lo anterior se explica debidos a que, en todas las demás estaciones, menos Ajusco (AJU), la temperatura presentó una mayor correlación con los iones neutralizantes de la lluvia (Ca^{2+} y NH_4^+) en comparación con los iones que le proveen la acidez y por lo tanto el aumento de la temperatura tiende a aumentar la basicidad en las precipitaciones de estas áreas. En la estación de muestreo Ajusco (AJU) fue todo lo contrario, la temperatura presentó una mayor correlación con los aniones que le atribuyen la acidez a la lluvia (Cl^- ($r=20$), NO_3^- ($r= 21$) y SO_4^{2-} ($r=20$)) y una menor correlación con los cationes que neutralizan a dichos aniones (NH_4^+ ($r=16$) y Ca^{2+} ($r=13$)), por lo que, el aumento de la temperatura en esta zona tiende a disminuir el pH (Ver Anexo A.IV.).

Como la correlación del pH con la temperatura es el inverso de la correlación del ion H^+ con esta variable, en la Figura 5.22 se observa que las estaciones de mayor correlación positiva entre la temperatura y el pH fue Ecoguardas Ajusco (EAJ) con $r=36$, mientras que la estación que presentó la menor correlación fue Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) con $r=2$, lo que nos da a entender que la disminución del pH en esta zona no está muy influenciado por los cambios de temperatura.

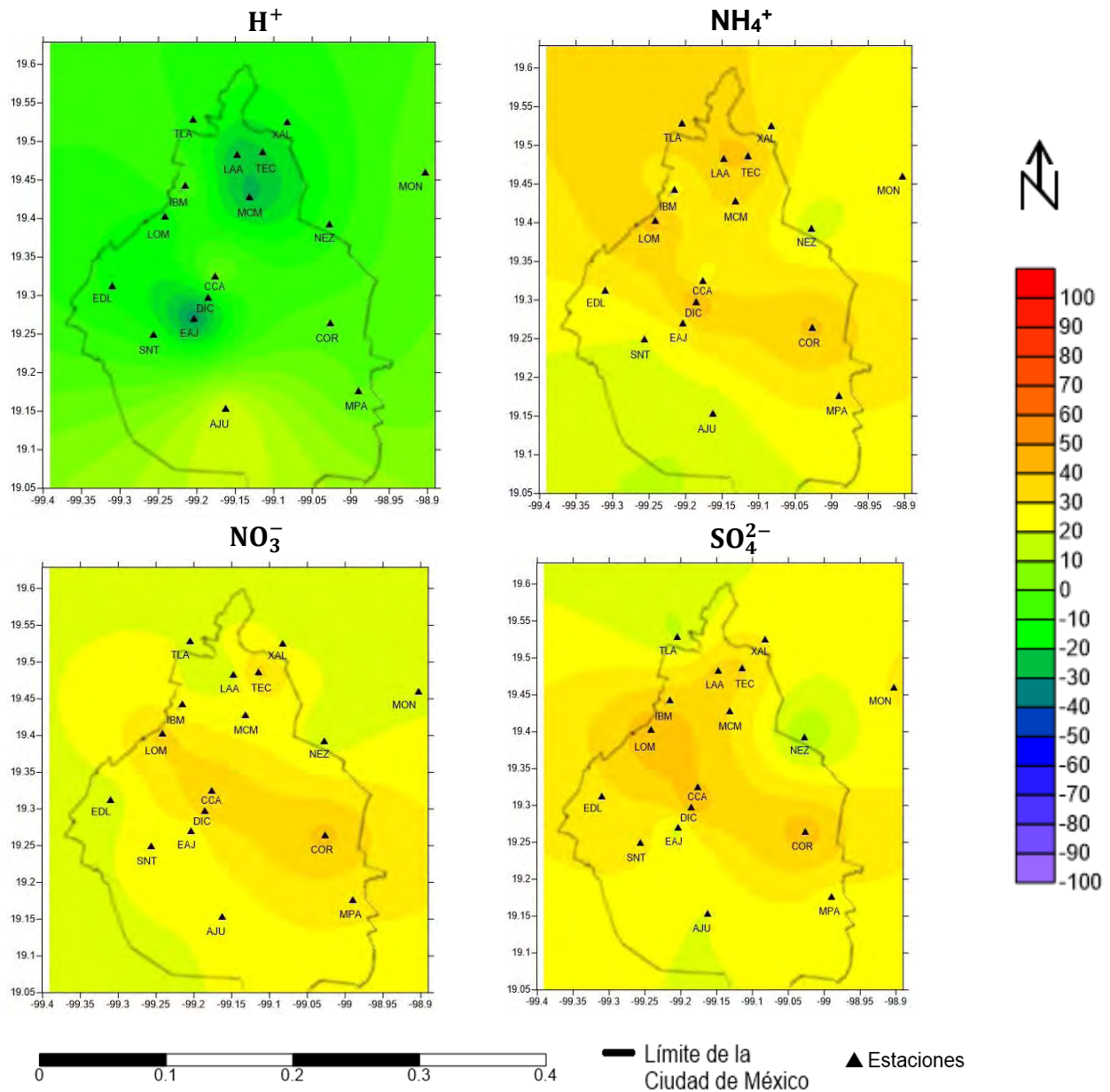


Figura 5.22 Correlación de Spearman entre la temperatura y los iones H^+ , NH_4^+ , NO_3^- y SO_4^{2-} para la ZMCM 2013-2016.

5.4.3 Correlación entre la humedad relativa y los iones H^+ , NH_4^+ , NO_3^- y SO_4^{2-}

La relación entre la humedad relativa y los iones H^+ , NH_4^+ , NO_3^- y SO_4^{2-} por estaciones de muestreo como se puede ver en la Figura 5.23, es muy similar a la relación de la precipitación con estos iones (Figura 5.21), debido a que la humedad relativa tiene una relación positiva con la precipitación.

Al igual que con la precipitación, la humedad relativa posee una correlación de baja a moderada negativa con los iones NH_4^+ , NO_3^- y SO_4^{2-} , por lo que a mayor valor de humedad relativa menores concentraciones de estos iones.

Los máximos valores de correlación negativa entre la humedad relativa y los iones NH_4^+ , NO_3^- y SO_4^{2-} se presentaron en la estación Ex Convento Desierto de los Leones (EDL) ubicada al suroeste de la ZMCM, con valores de $r=-56$, $r=-42$ y $r=-53$, respectivamente. Por otro lado, para los iones NH_4^+ y NO_3^- , la estación con menor correlación negativa fue Centro de Ciencias de la Atmosfera (CCA) con $r=-24$ y $r=-4$, respectivamente, mientras que en el caso del ion SO_4^{2-} la estación Nezahualcóyotl (NEZ) con $r=-7$ fue la que presentó menor valor de correlación negativa con esta variable.

En la Figura 5.23 se puede apreciar que el ion H^+ presentó una correlación de baja a moderada positiva con la humedad relativa, por lo que el pH, debido a su relación inversa con el ion H^+ , presenta una correlación de baja a moderada negativa, es decir a mayor humedad relativa, menor valor de pH y por lo tanto mayor acidez en las precipitaciones.

Se observó que la estación Nezahualcóyotl (NEZ) ubicada en el noreste de la ZMCM fue la de mayor correlación positiva entre el ion H^+ y la humedad relativa, por ende, fue la de mayor valor de correlación negativa entre el pH y la humedad relativa con $r=-36$, mientras que la estación Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) presentó el menor valor de correlación negativa, $r=-7$.

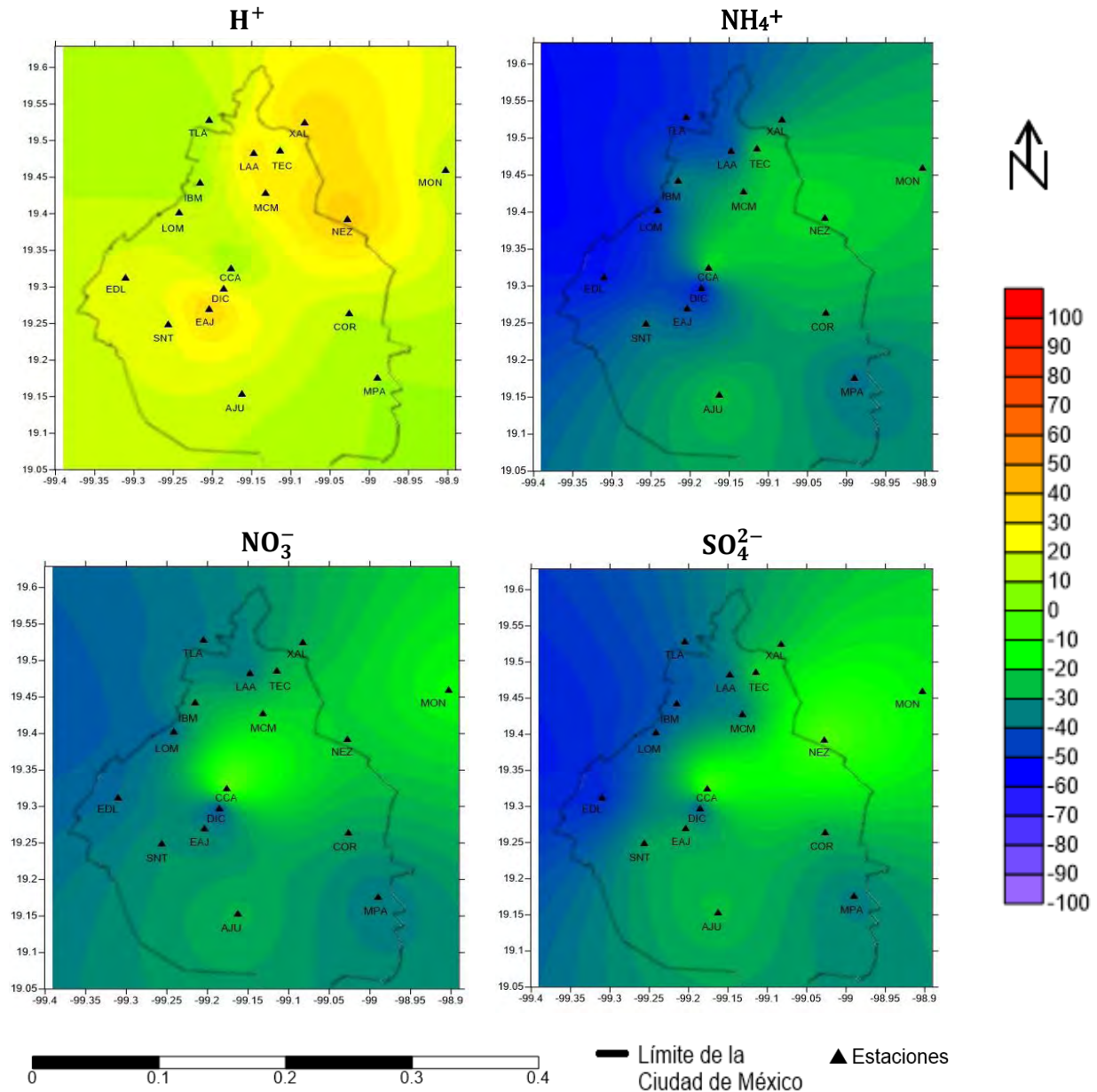


Figura 5. 23 Correlación de Spearman entre la humedad relativa y los iones H^+ , NH_4^+ , NO_3^- y SO_4^{2-} para la ZMCM 2013-2016.

5.4.4 Correlación entre la velocidad del viento y los iones H^+ , NH_4^+ , NO_3^- y SO_4^{2-}

En la Figura 5.24 se puede observar que, aunque no existe una marcada correlación entre la velocidad del viento (WSP) y los iones NH_4^+ , NO_3^- y SO_4^{2-} se mostró una ligera correlación negativa. Esta correlación negativa pudiera ser porque a mayor fuerza del viento, se produce un mayor transporte y dispersión de contaminantes en el área y por ende disminuyen sus concentraciones. Las estaciones con mayores correlaciones

negativas fueron Museo de la Ciudad de México (MCM) en el caso de los iones NH_4^+ y SO_4^{2-} con $r=-29$ y $r=-31$, respectivamente, y la estación Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) para el ion NO_3^- con $r=-29$.

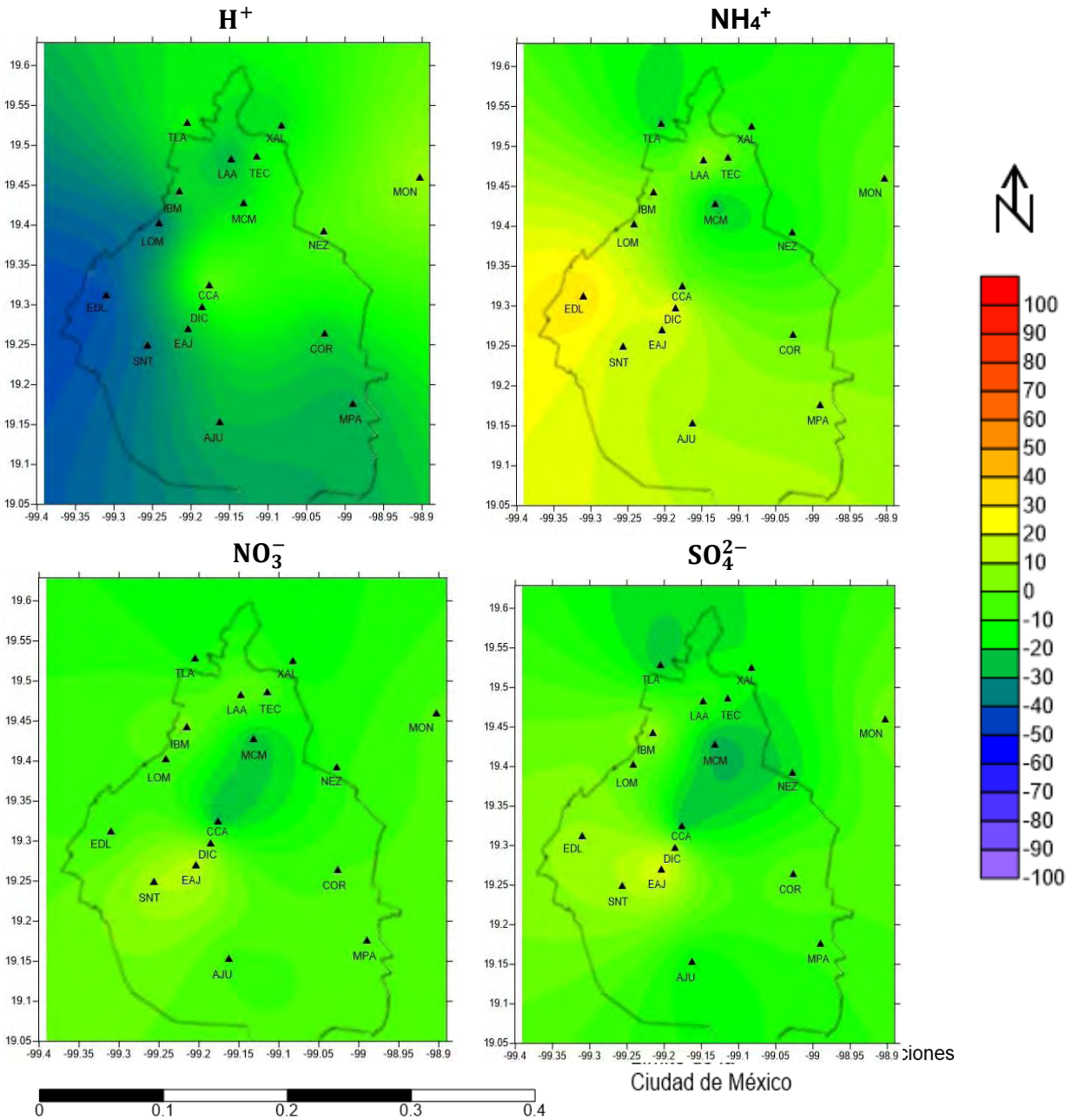


Figura 5.24 Correlación de Spearman entre la velocidad del viento y los iones H^+ , NH_4^+ , NO_3^- y SO_4^{2-} para la ZMCM 2013-2016.

Las estaciones con menores valores de correlación negativa fueron (Figura 5.24), Corena (COR) para el NH_4^+ con $r=-1$, las estaciones Diconsa (DIC) y Legaria (IBM) para el ion NO_3^- con $r=-2$ y Montecillo (MON) para el SO_4^{2-} con $r=-1$. Como se puede ver en estas últimas estaciones no se presentó ninguna relación entre estas variables.

La velocidad del viento presentó una correlación de baja a moderada negativa con el ion H^+ , por lo que el pH tendrá una correlación de baja a moderada positiva con la velocidad del viento, es decir, a mayor velocidad del viento, mayores valores de pH. Esta correlación positiva con el pH viene dada por el mismo principio explicado anteriormente, cuando se presentan mayores velocidades del viento se produce un mayor transporte y dispersión de los contaminantes y por ende disminuyen sus concentraciones, posibilitando un aumento en el pH de las precipitaciones. La estación de monitoreo que presentó mayor correlación negativa entre el pH y la velocidad del viento fue Ex Convento Desierto de los Leones (EDL) con $r=-46$, mientras que la estación que mostró la menor correlación negativa fue Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) con $r=-5$.

5.5 Regiones de procedencia de los precursores de lluvia ácida que causan depósito atmosférico húmedo en la ZMCM

Uno de los objetivos propuestos a cumplir con la realización del presente trabajo de investigación fue determinar las regiones de procedencia de los precursores de lluvia ácida que causan depósito atmosférico húmedo en la ZMCM, mediante el análisis de los eventos de lluvia en la estación ubicada en el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA). Se escogió esta estación debido a que se muestrea diariamente (las estaciones de la REDDA muestrean semanalmente), lo cual facilita saber con mayor exactitud, las condiciones meteorológicas que imperaron durante el evento de precipitación. Una vez analizados las muestras diarias colectadas en la estación del CCA correspondientes a los años desde 2014 a 2016, se dividieron en dos grupos de acuerdo a su pH, es decir, un primer grupo conformado por muestras ácidas ($\text{pH}<5.6$) y un segundo grupo conformado por muestras donde su $\text{pH}\geq 5.6$, luego se compararon dichos grupos con las direcciones del viento correspondiente a cada evento para saber qué direcciones imperaban en cada condición. El año 2013 no se incorporó a dicho análisis debido a que la RUOA (Red Universitaria de observatorios Atmosféricos de donde se obtuvo los datos meteorológicos para la estación del CCA (<http://www.ruoa.unam.mx/>)) no manejaba datos

de dicho año, por lo que era imposible saber exactamente la hora del evento de precipitación y por ende no se pudo hacer las corridas con el HYSPLIT.

En la Figura 5.25(a) se puede observar la relación entre la dirección del viento y los casos de lluvia ácida, nótese que, la dirección del viento más frecuente en estas lluvias es la del norte (N), norte-noroeste (NNO) y norte-noreste (NNE), este comportamiento de la dirección del viento nos da la idea de que las fuentes emisoras de los precursores de lluvia ácida se encuentran principalmente al norte de nuestro punto de referencia. En la Figura 5.25 (b) se puede ver la relación de la dirección del viento con aquellos casos donde el pH de las lluvias fue más alcalino, destacándose las direcciones del viento predominantes del sur-sureste (SSE) y suroeste (SO), lo que señala que en el sur de la estación del Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) hay menos fuentes emisoras de los precursores de lluvia ácida.

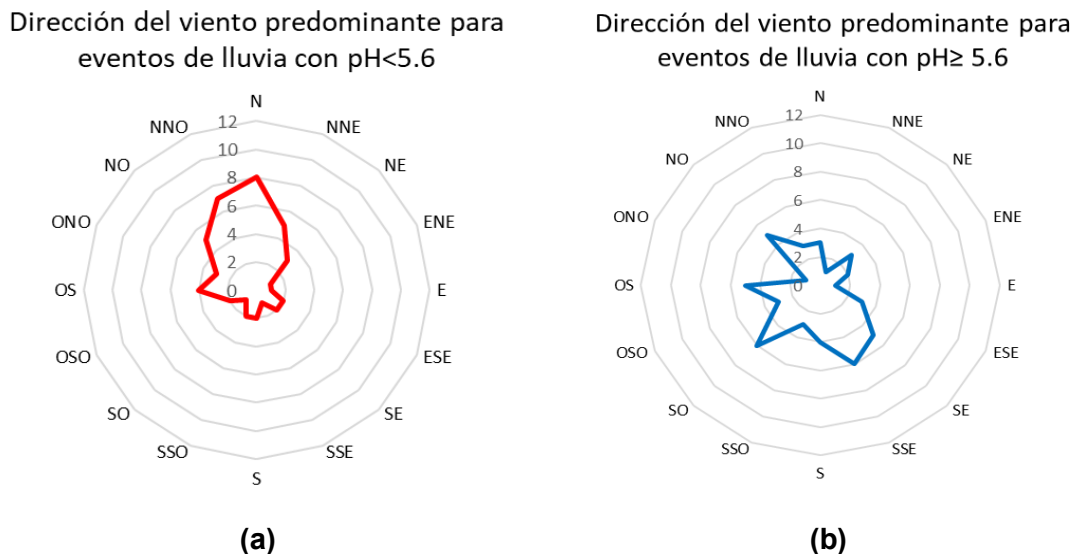


Figura 5. 25 Relación de la dirección del viento con el pH de las muestras de lluvias analizadas en la estación CCA durante el período 2013-2016.

Para comprobar lo anterior se utilizó un modelo de simulación de trayectorias de retroceso por ser una de las soluciones más completas y utilizadas para investigar el comportamiento de los contaminantes en la atmósfera. Como se explicó en el Capítulo IV, en este trabajo, se utilizó el modelo HYSPLIT, el cual nos brinda la trayectoria en

retroceso de las masas de aire y por lo tanto se determina el origen de las fuentes de los contaminantes.

Se simularon con el HYSPLIT 57 trayectorias de retroceso, con las cuales se pudo comprobar que las fuentes emisoras de los precursores de la lluvia ácida están ubicadas al norte de la ZMCM.

A continuación, se muestran los casos correspondientes a los días más ácidos durante el período de estudio, los eventos más alcalinos, y a los eventos de mayor concentración de SO_4^{2-} . En el Anexo A.V. se muestran un resumen de las simulaciones más ácidas y alcalinas restantes.

5.5.1 Trayectorias de retroceso para eventos ácidos y máximas concentraciones de SO_4^{2-}

En la Figura 5.26 (A, B y C) se muestran las trayectorias de retroceso de las masas de aire correspondientes a los días 15 de julio de 2014, 2 de septiembre de 2015 y 8 de julio de 2016, dichos días fueron de los más ácidos encontrados en sus respectivos años y además coinciden con presentar las mayores concentraciones de SO_4^{2-} .

Como se puede apreciar en la Figura 5.26 (A, B y C) las masas de aire provienen, en la mayoría de las trayectorias, del norte y norte-noreste apoyando lo obtenido en la Figura 5.25a. Para confirmar que las trayectorias obtenidas no presentaban errores se modelaron con el HYSPLIT matrices de trayectorias hacia adelante, lo cual se llevó a cabo mediante la ubicación de varios puntos alrededor de la estación del CCA (estrella roja en la Figura 5.26 (D, E y F)). Como se puede observar, en la Figura 5.26 (D, E y F) las trayectorias coinciden, demostrando así, que las mayores fuentes de emisiones de los precursores de lluvia ácida provienen del norte y del norte-noreste de la ZMCM.

Una vez determinadas las regiones de donde provienen los precursores de lluvia ácida, se decidió estudiar a detalle los mapas de flujo de viento para describir las condiciones del viento imperante en los días estudiados. Estos mapas de flujo se generaron en la página web <https://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/narr/plothour.pl> a partir de los datos de reanálisis NARR (North American Regional Reanalysis).

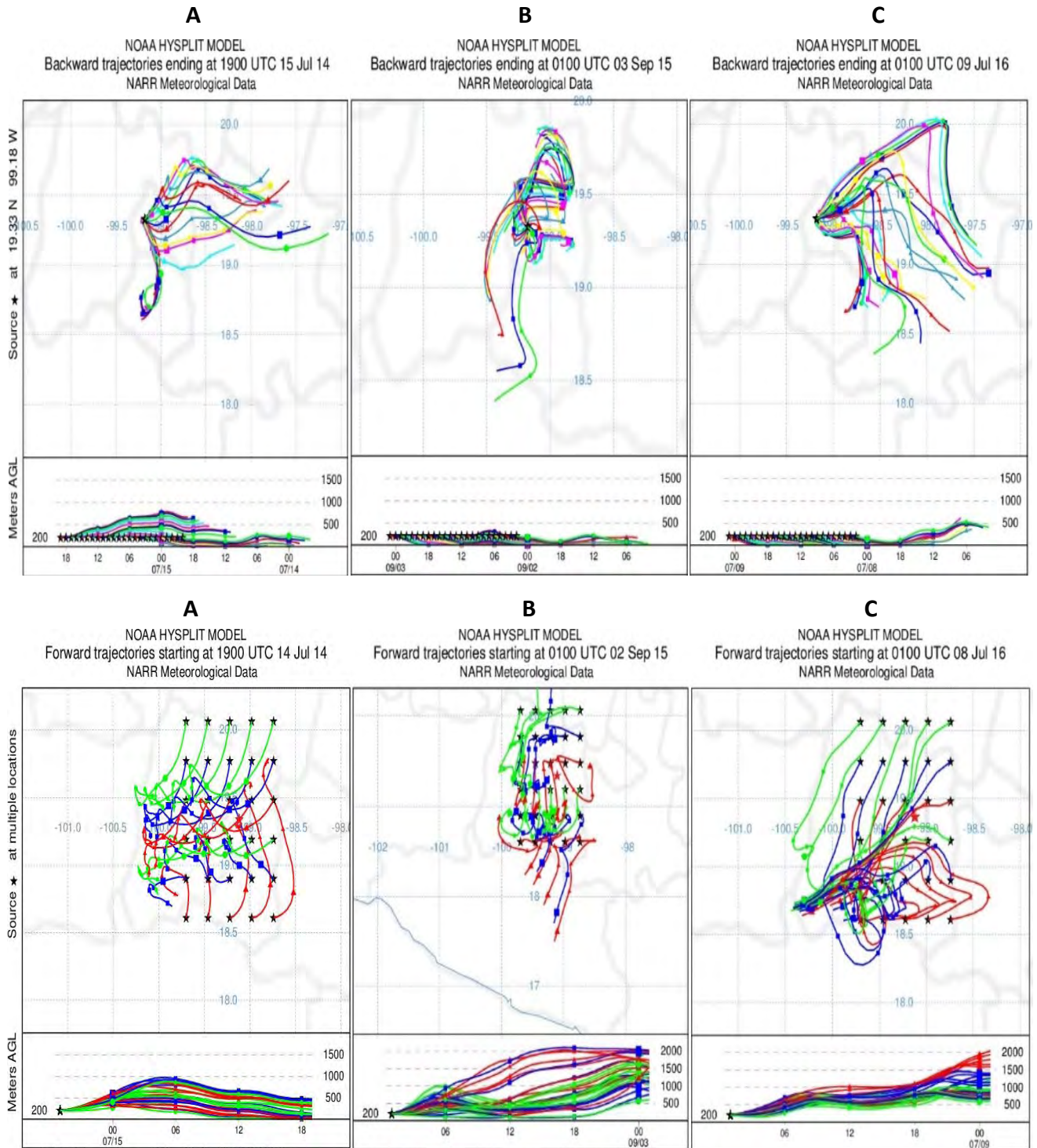


Figura 5.26 Corridas con el modelo HYSPLIT para los días con lluvia ácida en la estación del CCA. Trayectorias de retroceso para los días 15 de julio de 2014 (A), 2 de septiembre de 2015 (B) y 8 de julio 2016 (C). Matrices de trayectorias hacia adelante para los días 14 de julio 2014 (D), 1 de septiembre de 2015 (E) y 7 de julio de 2016 (F).

En la Figura 5.27 se pueden observar los mapas de flujo de viento para los días 15 de julio de 2014 (A), 2 de septiembre de 2015 (B) y 8 de julio de 2016 (C) en el nivel de 700 MB, en los horarios que ocurrieron los eventos de precipitación estudiados.

Además, en la Figura 5.27 (D, E y F) se pueden observar mapas de altura de geopotencial, los cuales se utilizaron para determinar qué sistemas sinópticos influyen sobre el patrón de viento de estos casos, ya que el análisis a escala sinóptica es imprescindible, dado que constituye el marco de referencia general para el desarrollo de los vientos locales en un área determinada (Soriano, et.al.,2015). Destacar que estos mapas sinópticos fueron realizados en el Centro de Pronóstico del Tiempo, Instituto de Meteorología (INSMET) de Cuba. Los mapas presentados en la Figura 5.27 al igual que los de las Figuras 5.26, 5.28 y 5.29 se encuentran en UTC (Tiempo Universal Coordinado), el cual en el horario de verano tiene una diferencia de UTC-5h respecto a la Ciudad de México, es decir las 22.00 UTC son las 17.00 en la Ciudad de México.

En la Figura 5.27 (D) se puede apreciar que en el día 15 de julio de 2014 a las 19.00 UTC se extiende la dorsal del anticiclón subtropical sobre gran parte de México, este sistema tiene un centro secundario de alto valor de geopotencial localizado al sureste del país, el cual impone un flujo de vientos débiles con componente del este (E) (Figura 5.27 (A)), sobre nuestra área de estudio. El día 3 de septiembre de 2015 a las 01.00 UTC se puede observar en la Figura 5.27 (E) que en el centro de México se encuentra un centro de alto valor de geopotencial el cual impone vientos (Figura 5.27 (B)) de componente noreste (NE) y del este (E) sobre la ZMCM. Por último, para el día 9 de julio de 2016 a las 01.00 UTC se puede ver como en la Figura 5.27 (C) el flujo tiene una componente del noreste (NE) asociado a un trough (Área alargada de presión atmosférica relativamente baja, usualmente no asociada con una circulación cerrada (<http://www.nws.noaa.gov/glossary/>)) inducido que extiende todo su eje por toda la región central de México (Figura 5.27 (F) por la presencia de dos centros de altos valores de geopotencial, uno con centro al sur de la Florida y el otro con centro en la porción sur de la península de Baja California.

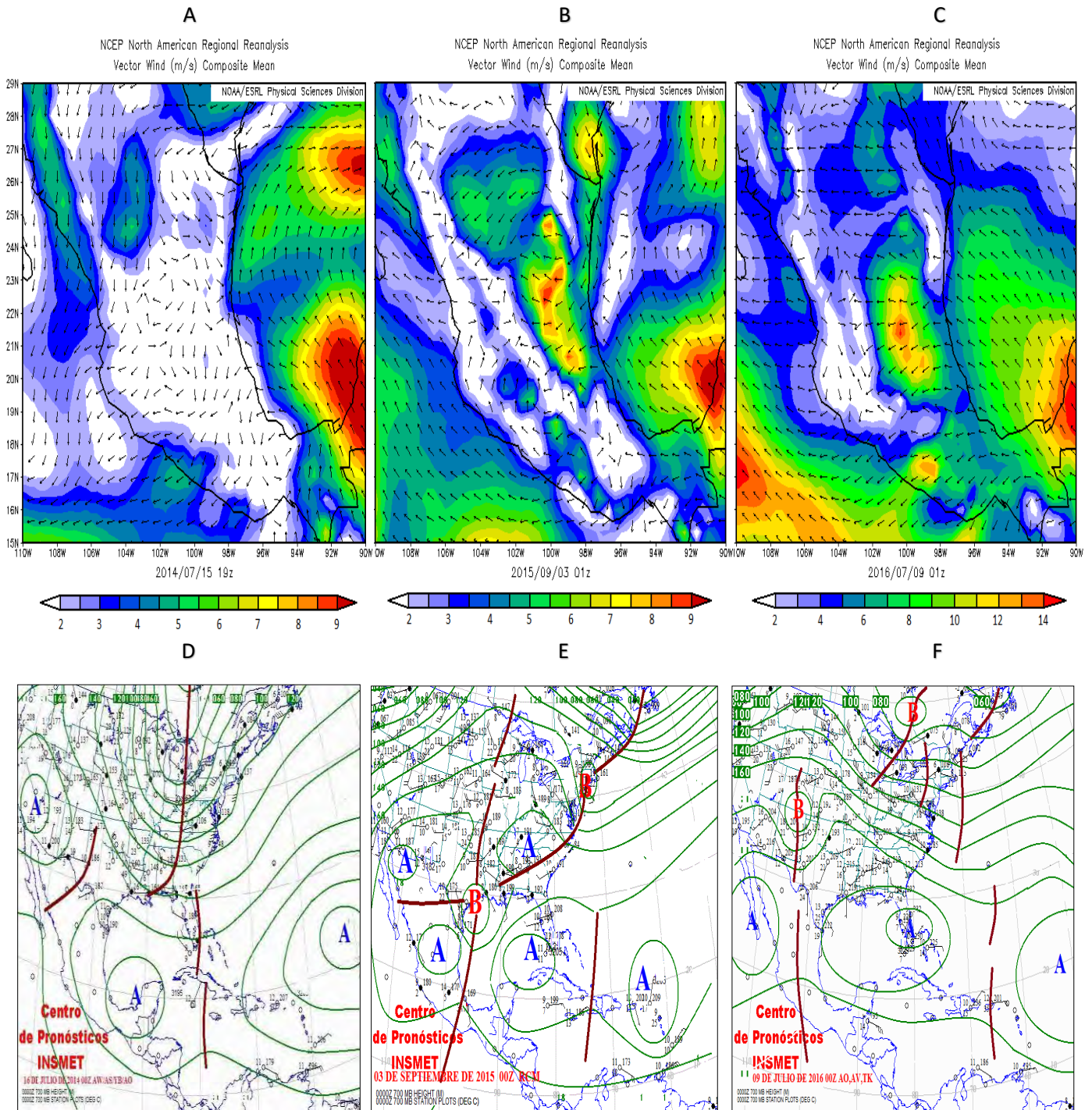


Figura 5.27 Mapas de flujo de 700 MB para los días 15 de julio de 2014 (A), 2 de septiembre de 2015 (B) y 8 de julio 2016 (C). Mapas de altura geopotencial en el nivel de 700 para los días 15 de julio de 2014 (D), 2 de septiembre de 2015 (E) y 8 de julio 2016 (F).

(Fuente: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/narr/plothour.pl> e INSMET (Centro de Pronóstico del Tiempo. Instituto de Meteorología, Cuba))

5.5.2 Trayectorias de retroceso para eventos alcalinos

Para los eventos alcalinos se procedió de la misma manera que con los eventos ácidos, en este apartado se muestran la trayectoria de los algunos de los eventos más alcalinos de los años 2014, 2015 y 2016, los demás se muestran en el Anexo A.V. En la Figura 5.28 (A, B y C) se muestran las trayectorias de retroceso de las masas de aire correspondientes a los días 11 de julio de 2014, 22 de junio de 2015 y 24 de julio de 2016, dichos días fueron de los más alcalinos encontrados en sus respectivos años. Como se puede observar en la Figura 5.28 (A, B y C) las masas de aire provienen, en la mayoría de las trayectorias, del sur y del sureste apoyando lo obtenido en la Figura 5.25b. Al igual que en los casos anteriores se realizaron matrices de trayectorias hacia adelante para verificar que las trayectorias estaban bien, y como se puede ver en la Figura 5.28 (D, E y F), destacándose la estación del CCA con una estrella roja en la Figura, las trayectorias indican que el viento proviene del sur y del sureste, al igual que con lo modelado en la parte superior de la Figura 5.28. Es decir, cuando el viento proviene de estas direcciones, trae bajas concentraciones de los precursores de lluvia ácida por lo que no favorece a la formación de dicho fenómeno.

En la Figura 5.29 se aprecian los mapas de flujo de viento para los días 11 de julio de 2014 (A), 22 de junio de 2015 (B) y 24 de julio 2016 (C) en el nivel de 700 MB, en los horarios que ocurrieron los eventos de precipitación estudiados y sus correspondientes mapas de altura de geopotencial (D, E y F). Para el día 11 de julio de 2014 a las 22.00 UTC en el campo de geopotencial se observa (Figura 5.29 (D) que, en el nivel de 700 MB, se localiza un centro secundario de alto valor de geopotencial al sur de los Estados Unidos de América, este sistema impone un flujo débil del este (E) al sureste (SE) en la ZMCM, ello corresponde con las trayectorias de retroceso mostradas por el HYSPLIT. El día 23 de junio de 2015 a las 00.00 UTC en la Figura 5.29 (B), se puede observar la componente sureste del flujo asociada a la periferia de un centro de alto valor de geopotencial ubicado al norte del Golfo de México. Por último, para el día 25 de julio a las 02.00 UTC se puede ver en la Figura 5.29 (F) cómo se presenta un débil gradiente en el campo de geopotencial, destacándose un débil flujo con componente sureste (SE) y sur (S) (Figura 5.29 (C)).

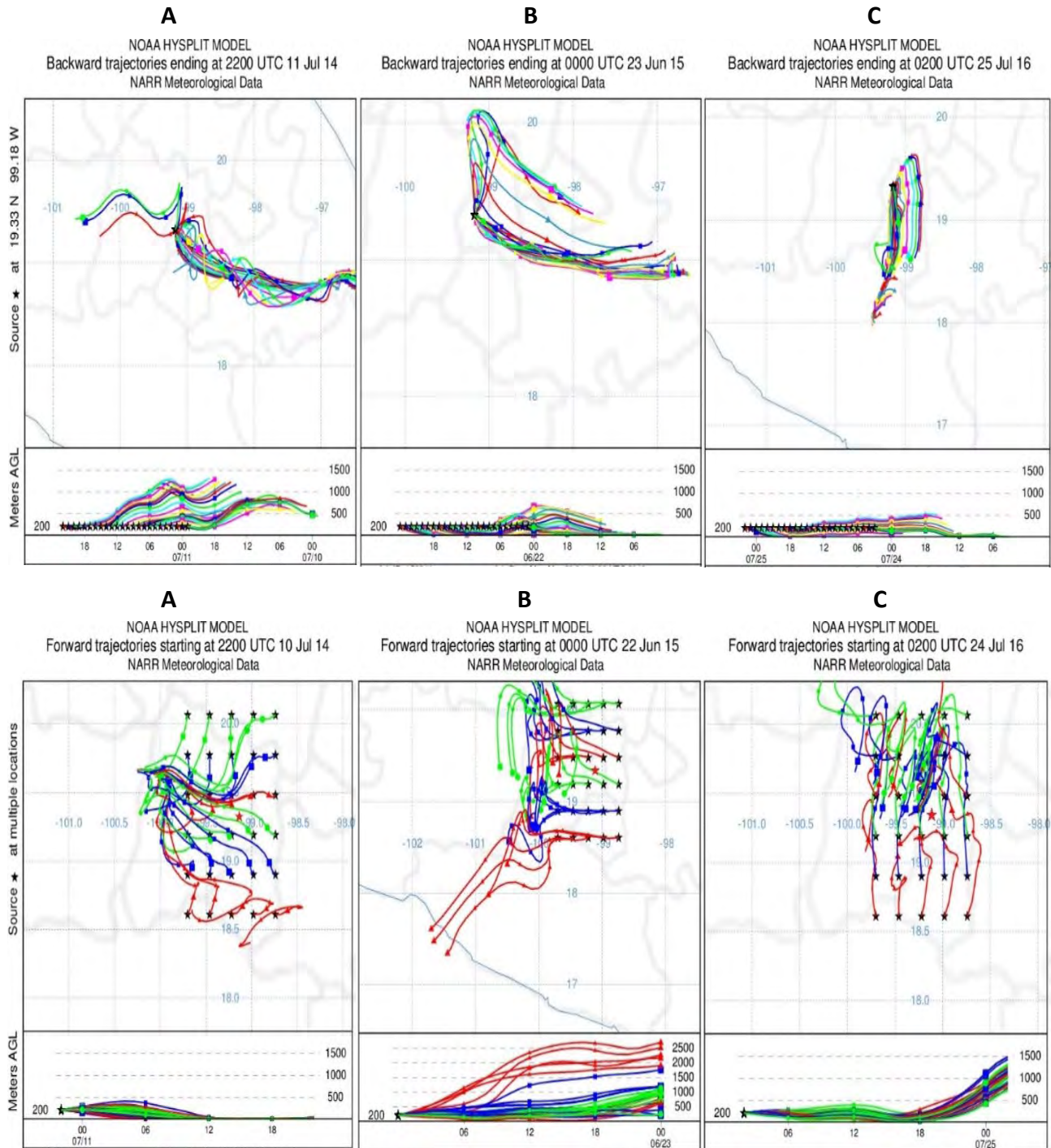


Figura 5.28 Corridas con el modelo HYSPLIT para los días con lluvia alcalina en la estación del CCA. Trayectorias de retroceso para los días 11 de julio de 2014 (A), 22 de junio de 2015 (B) y 24 de julio 2016 (C). Matrices de trayectorias hacia adelante para los días 10 de julio 2014 (D), 21 de septiembre de 2015 (E) y 6 de julio de 2016 (F).

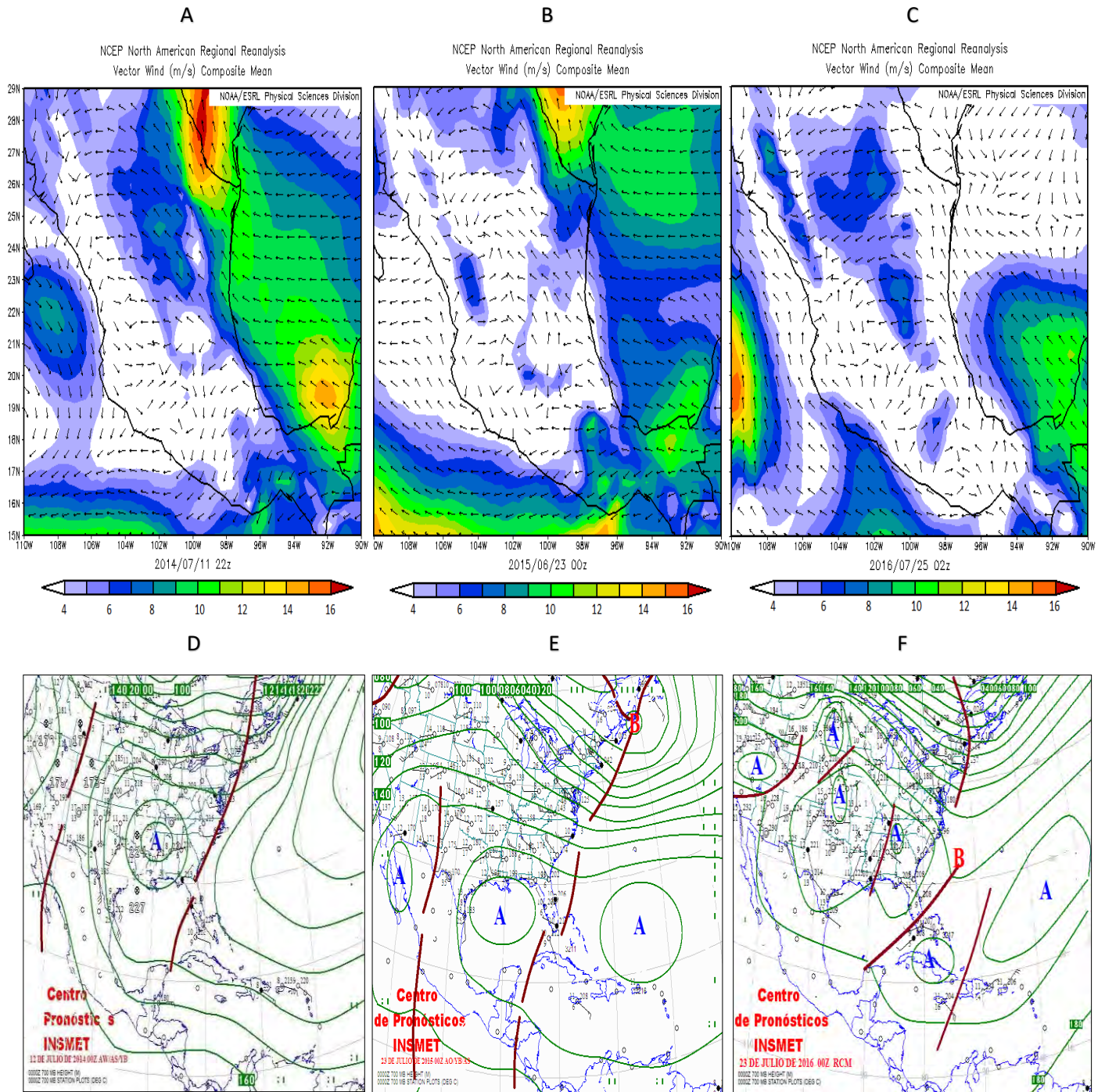


Figura 5. 29 Mapas de flujo de 700 MB para los días 11 de julio de 2014 (A), 22 de junio de 2015 (B) y 24 de julio 2016 (C). Mapas de altura geopotencial en el nivel de 700 para los días 11 de julio de 2014 (D), 22 de junio de 2015 (E) y 24 de julio 2016 (F).

(Fuente: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/narr/plothour.pl> e INSMET (Centro de Pronóstico del Tiempo. Instituto de Meteorología, Cuba))

5.6 Propuesta de medidas de prevención, minimización y control de los precursores de lluvia ácida

Los resultados de este trabajo muestran que las concentraciones de los iones SO_4^{2-} y NO_3^- fueron unas de las mayores en comparación con las de los demás iones, además, se pudo comprobar mediante la correlación de los mismos con el pH de la lluvia, que estos influyen directamente en la acidificación de las precipitaciones y que debido a la aglutinación de las principales industrias en la zona norte y a los vientos dominantes de la ZMCM, las emisiones impactan directamente en las áreas densamente pobladas aportándole grandes problemas de contaminación atmosférica. Por todas estas razones, se hace necesario eliminar o disminuir las emisiones de los precursores de lluvia ácida (SO_2 y NO_x) mediante la implementación o aplicación de cualquier política, estrategia o acción para eliminar o minimizar los impactos adversos.

En consecuencia, se proponen una serie de medidas para los sectores industriales y transporte específicamente, por ser los que aportan las máximas concentraciones de SO_2 y NO_x en la ZMCM, las cuales deben implementarse de forma integrada para llevar a cabo una adecuada gestión de la calidad del aire.

En el sector industrial-energético una medida prioritaria es el control de las emisiones de las grandes fuentes fijas. Para ello se pueden utilizar diferentes técnicas, entre las cuales están las que implementan procedimientos de optimización o reformulación del proceso de combustión o la utilización de dispositivos que actúan sobre la corriente de los gases originados en la combustión. A continuación, se enuncian algunas:

- ✚ Uso de combustibles fósiles con menor cantidad de azufre en sectores energéticos e industriales para disminuir las emisiones de contaminantes atmosféricos generados por su operación. La desventaja en esta medida está en que el crudo mexicano tiene alto contenido de azufre en comparación con otros a nivel mundial y en el caso de un cambio de combustible, dígase de combustóleo a gas natural, se necesitaría hacer además del cambio de combustible, una reconfiguración total de la planta para instalar quemadores apropiados al nuevo combustible.
- ✚ Cambio de quemadores frontales a tangenciales para obtener una combustión más completa.

- ✚ Desulfuración de gases de combustión. En este proceso, al gas de combustión se le hace reaccionar con un compuesto alcalino en polvo o acuoso, para la formación de sulfatos sólidos, los cuales son removidos del equipo. Los compuestos más utilizados son carbonato de calcio, óxidos de calcio, carbonato de sodio u óxidos de magnesio.
- ✚ Disminuir las actividades de las industrias que no tengan aplicados controles de emisiones en los días de contingencias provocadas por la alta actividad del volcán Popocatépetl, para así disminuir las concentraciones de SO_2 en la ZMCM.

En el sector del transporte se deben tomar también varias medidas, ya que la mayor emisión de los NO_x en la ZMCM proviene de este sector. Ejemplos de estas son:

- ✚ Fomentar el uso de combustibles alternativos en vehículos dentro de la ciudad para uso particular, de transporte público y de carga.
- ✚ Establecer corredores de transporte que utilicen la periferia de la ciudad.
- ✚ Implementar la conducción eficiente, esta es una práctica que, aprovechando sólo un cambio de hábitos y sin requerir inversiones en equipamientos, permite reducir el consumo de combustible y aprovechar mejor lo que se consume. En este sentido, la conducción eficiente permite ahorrar de un 10% a un 25% del carburante y reducir considerablemente las emisiones de contaminantes en la ciudad.
- ✚ Fomentar el cambio absoluto de todo el parque vehicular (metrobusés, camiones y automóviles) a híbridos o eléctricos.
- ✚ Impulsar el uso de la bicicleta dentro de la ciudad, como forma de turismo ecológico.

CAPÍTULO VI
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- ✚ Inicialmente se realizó una revisión bibliográfica sobre la relación entre las condiciones meteorológicas y el depósito atmosférico húmedo encontrándose a nivel internacional un gran número de investigaciones que nos permitieron comenzar a elaborar este trabajo de investigación y conocer el aporte del mismo.
- ✚ Posteriormente se caracterizó la variación espacial y temporal de las variables meteorológicas en la zona de estudio a partir de la información disponible en la Red de Estaciones Meteorológicas, comprobándose de esta manera que la temperatura, la precipitación y la humedad relativa presentaron mayor variabilidad en comparación con la velocidad del viento, debido principalmente al relieve de la ZMCM y a factores urbanos. Conjuntamente, las rosas de viento realizadas para cada estación meteorológica mostraron que la dirección del viento predominante en la ZMCM es la del norte, provocando que los contaminantes se desplacen desde el norte hacia el sur del área de estudio.
- ✚ La distribución espacial y temporal de la composición química del depósito atmosférico húmedo en el área de estudio mostró que las estaciones Ajusco (AJU) y Milpa Alta (MPA) ubicadas en el sur de la ZMCM presentaron los menores valores de pH en los años estudiados, propiciado por bajos valores de temperatura, altos valores de humedad relativa, precipitaciones moderadas y vientos predominantes del norte, los cuales transportan la contaminación desde las zonas industrializadas al norte de la ciudad hacia el sur dentro de un valle semicerrado, provocando un estancamiento de los mismos e influencia en el grado de acidez del depósito atmosférico húmedo.
- ✚ El ion que presentó la mayor concentración en $\mu\text{Eq/L}$ fue el NH_4^+ seguido por los iones SO_4^{2-} y NO_3^- . Las estaciones ubicadas al norte de la ZMCM presentaron las máximas concentraciones de estos iones debido a la cercanía de estas estaciones a la región industrializada, a las bajas precipitaciones características de esta zona que hacen que haya menos dilución de los contaminantes y a las altas temperaturas que posibilitan el paso de los contaminantes en estado gaseoso a iones, potenciando las concentraciones de los mismos en las precipitaciones.

- ✚ Los iones que presentaron los mayores valores de depósito en kg/ha, en orden decreciente fueron el SO_4^{2-} , NO_3^- y NH_4^+ , destacándose la región oeste de la ZMCM por presentar el mayor depósito de estos iones influenciado principalmente por tener los mayores acumulados de precipitación en los años estudiados.
- ✚ La alta concentración SO_4^{2-} y su correlación con el pH mediante el método de Spearman señaló que la acidez de la lluvia en la ZMCM puede deberse principalmente a la formación de H_2SO_4 . Además, la alta concentración del ion Ca^{2+} (proveniente de las construcciones y de la resuspensión del polvo del suelo) fue la que más contribuyó a la neutralización de los compuestos ácidos presentes en la lluvia (SO_4^{2-} y NO_3^-) como lo confirma la correlación significativa entre estas especies. Por otra parte, la correlación entre las variables meteorológicas analizadas en este estudio y los iones presentes en la lluvia permitieron confirmar hipótesis ya establecidas: a mayor temperatura se presenta mayor pH y mayores concentraciones de iones, mientras que, a mayor precipitación y humedad relativa menores valores de pH y menores concentraciones de iones.
- ✚ El análisis de los eventos de lluvia en la estación ubicada en el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) mostró que los precursores de lluvia ácida que causan depósito atmosférico húmedo en la ZMCM provienen principalmente de las emisiones provocadas al norte del área de estudio.
- ✚ La puesta en práctica de medidas de prevención, minimización y control de los precursores de lluvia ácida propuestas en el capítulo anterior es la vía posible para reducir a mediano y largo plazo el depósito de estos acidificantes en la ZMCM y así tener una atmósfera más limpia.

6.2. Recomendaciones

- ✚ Realizar muestreos diarios de depósito atmosférico húmedo en las estaciones que conforman la REDDA para poder tener una mejor visión sobre las condiciones

meteorológicas que rigen los determinados eventos de precipitación en los sitios de muestreo y facilitar el uso de modelos de trayectorias de retroceso.

- ✚ Vincular la REDDA y la REDMET de forma tal que en todas las estaciones se hagan muestreos meteorológicos y de depósito atmosférico para no tener que interpolar las variables meteorológicas en aquellas estaciones de la REDDA en donde no se muestrean las mismas, y así tener una mejor caracterización de las condiciones meteorológicas de cada estación donde se muestrea el depósito atmosférico húmedo.
- ✚ Determinar mediante modelos químicos y meteorológicos acoplados la contribución de los principales procesos de remoción húmeda (rain-out y wash-out) al depósito atmosférico húmedo y así obtener una mejor comprensión de la física y química de la precipitación y mejorar el entendimiento de dichos procesos.
- ✚ Ampliar los resultados obtenidos hasta el momento incorporando la influencia de los sistemas sinópticos y otras variables meteorológicas no abordadas en este trabajo (radiación, nubosidad, altura de la capa de mezcla y estabilidad atmosférica) sobre el depósito atmosférico húmedo.
- ✚ Se recomienda la aplicación de un modelo de dispersión global (que estudie la interacción entre la química y la meteorología de alta resolución teniendo en cuenta las características particulares de la ZMCM) para evaluar la procedencia de precursores de lluvia ácida.
- ✚ Poner atención a las fuentes emisoras de precursores de lluvia ácida que se encuentran localizadas al exterior de la ZMCM y que no apliquen medidas estrictas para el control de las emisiones de SO_2 y NO_x , como es el uso actual de combustóleo con alto contenido de azufre, el cual fue erradicado en la ZMCM desde los años 90.

CAPÍTULO VII
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- # **Alarcón, A.L., 2012.** *Lluvia ácida en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Evaluación y Trascendencia.* Tesis de maestría en Ingeniería Ambiental. UNAM, México.
- # **Anderson, D. R., Sweeney, D. J., y Williams, T. A., 1999.** *Estadística para administración y economía.* México: International Thomson Editores.
- # **André, F., Jonard, M. y Ponette, Q., 2007.** *Influence of the meteorological factors and polluting environment on rain chemistry and wet deposition in a rural area near Chimay, Belgium.* Atmospheric Environment 41: 1426-1439 pp.
- # **Báez, A.P., Belmont, R.D., García, R.M., Torres, M.C.B. y Padilla, H.G., 2006.** *Rainwater chemical composition at two sites in Central Mexico.* Atmospheric Research 80: 67– 85 pp.
- # **Ballinas, M.J., 2011.** *Mitigación de la isla de calor urbana: estudio de caso de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.* Tesis de Maestría en Ciencias. UNAM, México.
- # **Berliand, M. E., 1979.** *Manual para el control de la Contaminación atmosférica.* Hidrometeoizdat, Leningrado. 448 pp.
- # **Bravo, H., Soto, R., Sosa, R. y Sánchez, P., 2003.** *Efecto de la lluvia ácida en el material constituyente de los monumentos mayas mexicanos.* Ingeniería Investigación y Tecnología Vol. IV, No 4, 195-206 pp.
- # **Bravo, H., Soto, R., Sosa, R., Sánchez, P., Alarcón, A.L. y Ruiz, J., 2004.** *Effects of wet acidic deposition on stony material at El Tajín archaeological site in Veracruz, Mexico.* 97th Air and Waste Management Association Annual Meeting, Indianapolis. AWMA-04-A-53.
- # **Buda, A. y DeWalle, D.R., 2002.** *Potential effects of changes in precipitation and temperature on wet deposition in central Pennsylvania.* Atmospheric Environment 36: 3767-3778 pp.
- # **Butler, T., Likens, G., Vermeylenc, F., Stunder, B., 2003.** *The relation between NOx emissions and precipitation NO3 in the eastern USA.* Atmospheric Environment 37: 2093–2104 pp.
- # **Cala, Y.A., 2015.** *Patrones sinópticos y zonas de procedencia de masas de aire asociados a la acidificación de las lluvias en Casablanca.* Tesis de Licenciatura en Meteorología. INSTEC, Cuba.

- ✚ **Calori G., Clemente M., De Maria R., Finardi S., Lollobrigida F. y Tinarelli G., 2006.** *Air quality integrated modelling in Turin urban area.* Environmental Modelling & Software 21(4): 468-476 pp.
- ✚ **Campos, V., Costa, A. y Tavares, T., 2007.** *Partial neutralization of rain by seaspray: The case of Reconcavo, Bahia—Brazil.* Journal of Environmental Management 84.
- ✚ **Camuffo, D., 1992.** *Acid rain and deterioration of monuments: how old is the phenomenon?* Atmospheric Environment 26B (2): 241-247 pp.
- ✚ **Carn, S. A., Fioletov, V. E., McLinden, C. A., Li, C. y Krotkov, N. A., 2017.** *A decade of global volcanic SO₂ emissions measured from space.* <http://www.nature.com/scientificreports>.
- ✚ **Cavazos, G., 2013.** *Lluvia ácida y biodeterioro en la fortaleza de San Juan de Ulúa, Veracruz, México, monumento del patrimonio cultural.* Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas. UNAM, México.
- ✚ **Soriano, C., Fernández, A. y Martín-Vide, J., 2015.** *Sobre el uso de los procesos sinópticos objetivos y los modelos meteorológicos a alta resolución para el estudio de los patrones circulatorios atmosféricos a escala regional.* International Journal of Environment and Pollution.
- ✚ **Fuentes, V., 2015.** *Elementos de Ingeniería Ambiental. Parte uno. Principios y aplicaciones fundamentales.* 2 edición. UNAM. 201 pp.
- ✚ **INSMET, 2014-2016.** *Mapas de flujo de 700 MB.* La Habana, Cuba.
- ✚ **Cohen, A.J., Ross, H., Ostro, B., Pandey, K.D, Krzyzanowski, M., Künzli, N., Gutschmidt, K., Pope, A., Romieu, I., Samet, J.M. y Smith, K., 2005.** *The Global Burden of Disease Due to Outdoor Air Pollution.* Journal of Toxicology and Environmental Health-Part A 68(13-14):1301-1307 pp.
- ✚ **Collazo, A.E., 2015.** *Modelación Regional de la Contaminación Atmosférica.* Inédito.
- ✚ **Curtis, L., Rea, W., Englert, N., 2006.** *Adverse Health Effects of Outdoor Air Pollutants.* Environment International 32(6): 815-830 pp.
- ✚ **Dai, Z., Liu, Y., Wang, X. y Zhao, D., 1998.** *Changes in pH, CEC, and exchangeable acidity of some forest soils in southern China during the last 32–35 years.* Water Air Soil Pollution. 108: 377–390 pp.
- ✚ **Dasgupta, P.K., Campbellb, S.W., Al-Horra, R.S., Ullaha, S.M., Lia, J., Amalfitanoc, C., Poorc, N.D., 2007.** *Conversion of sea salt aerosol to NaNO₃ and the*

- production of HCl: Analysis of temporal behavior of aerosol chloride/nitrate and gaseous HCl/HNO₃ concentrations with AIM. Atmospheric Environment 41(20).*
- # **Doménech, X., 2006.** *Química Ambiental de sistemas terrestres.* Barcelona. 32 pp.
 - # **Draxler, R. y Hess, G., 1998.** *An Overview of the HYSPLIT-4 Modelling System for Trajectories, Dispersion and Deposition.* Aust. Met. Mag. 47: 295-308 pp.
 - # **Draxler, R., Stunder, B., Rolph, G., Stein, A. y Taylor, A., 2009.** *HYSPLIT User's Guide.* Version 4. http://www.arl.noaa.gov/documents/reports/hysplit_user_guide.pdf
 - # **Duce, R.A., Hoffman, G.L., Zoller, W.H., 1975.** *Atmospheric trace metals at remote northern and southern hemisphere sites: pollution or natural.* Science 187: 59–61 pp.
 - # **Duce, A.R., Mohnen, V.A. y Zimmerman, D.G., 1983.** *Organic material in the global troposphere.* Rev. Geophys. Space Phys. 21: 921-952 pp.
 - # **Elorza, H. y Medina, J. C., 1999.** *Estadística para las ciencias sociales y del comportamiento.* México: Oxford University.
 - # **Ezcurra, E. y Mazari, M., 1996.** *Are Megacities Viable? A Cautionary Tale from Mexico City.* Environment 38: 6-35 pp.
 - # **Follos, F., 2012.** *Manual básico para el tratamiento de datos de calidad del aire mediante el lenguaje estadístico R y paquetes adicionales como OPENAIR.* http://www.openair-project.org/PDF/R_Openair_aplicado_a_calidad_del_aire.pdf/
 - # **Galindo, I., 1989.** *Transformaciones energéticas en la atmósfera urbana originadas por la contaminación atmosférica.* Rev. Sociedad Mexicana de Historia Natural, volumen especial, ecología urbana. SMHN. 220 pp.
 - # **Galloway, J.N., Likens, G.E. y Hawley M.E., 1984.** *Acid precipitation: natural versus anthropogenic components.* Science 226: 829-831 pp.
 - # **García, R., 2007.** *Determinación de metales pesados en la precipitación pluvial de una zona urbana (Ciudad de México) y de una zona rural (Rancho Viejo, EDO. De México).* Tesis de Doctor en Ciencias. UNAM, México.
 - # **Gauderman, W.J., Vora, H., McConnell, R., Berhane, K., Gilliland, F., Thomas, D., Lurmann, F., Avol, E., Kunzli, N., Jerrett, M. y Peters, J., 2007.** *Effect of Exposure to Traffic on Lung Development from 10 to 18 Years of Age. A Cohort Study.* Lancet. 369(9561): 571-577 pp.

- # **Gauri, K., 1982.** *Effect of Acid Rain on Structures. Acid Rain Proceedings at a Session Sponsored by the Research Council on Environmental Impact Analysis of the ASCE Nation Convention.* ASCE Nation Convention 1982. 70-91 pp.
- # **Godish, T., 2004.** *Air Quality.* Lewis Publishers, E.U.A.
- # **González, M. y Bergowist, E., 1986.** *El impacto de emisiones de gases y otros productos desde chimeneas de fundiciones de minerales sobre las actividades agropecuarias.* Ambiente y Desarrollo II 3: 117-122 pp.
- # **Groneberg, D.A. y Witt, C., 2005.** *Air Quality and Particulate Matter.* Pneumologie. 59(9): 607-611 pp.
- # **Heinke W. G. y Henry J. G., 1999.** *Ingeniería Ambiental.* Prentice Hall Hispanoamericana, S.A. México. 216-253 pp.
- # **Hernández, G., García, R., Solís, S., Martínez, S., Mercado, I., Ramírez, M., Scharek, P. y Solorio, G., 2012.** *Presencia del Hg total en una relación suelo-planta-atmósfera al sur de la Sierra Gorda de Querétaro, México.* Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas 15(1): 5-15 pp.
- # **Hernández, R. y Fernández, C., 1998.** *Metodología de la investigación.* México: McGraw-Hill.
- # **Hinds W. C., 1999.** *Aerosol Technology. Properties Behavior and Measurement of Airborne Particles.* Department of Environmental Health Sciences. Center for Occupational and Environmental Health. UCLA, Estados Unidos.
- # **Hoffmann, B., Moebus, S., Möhlenkamp, S., Stang, A., Lehmann, N., Dragano, N., Schmermund, A., Memmesheimer, M., Mann, K., Erbel, R. y Jöckel, K.H., 2007.** *Residential Exposure to Traffic is Associated with Coronary Atherosclerosis.* Circulation. 116(5):489-496 pp.
- # **Hruška, J., Moldan, F. y Krám, P., 2002.** *Recovery from acidification in central Europe- observed and predicted changes of the soil and stream water chemistry in the Lysina catchment, Czech Republic.* Environmental Pollution 120 (2): 261-274 pp.
- # **Hu J., Ying Q., Chen J., Mahmud A., Zhao Z., Chen S. y Kleeman M.J., 2010.** *Particulate air quality model predictions using prognostic vs. diagnostic meteorology in central California.* Atmospheric Environment 44 (2): 215-226 pp.
- # **Huang, K., Zhuang, G., Xu, C., Wang, Y. y Tang, A., 2008.** *The chemistry of the severe acidic precipitation in Shanghai, China.* Atmospheric Research 89:149-60 pp.

- ✚ **INEGI, 2013.** *Guía para la interpretación de cartografía: uso del suelo y vegetación: escala 1:250,000: serie V.* México.
- ✚ **INEGI, 2015.** *Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE).* México.
- ✚ **Jain, R., Vaughana, J., Heitkamp, K., Ramos, C., Claiborn, C., Schreuder, M., Schaaf, M. y Lamb, B., 2007.** *Development of the Clear Sky smoke dispersion forecast system for agricultural field burning in the Pacific Northwest.* Atmospheric Environment 41 (32):6745-6761 pp.
- ✚ **Jáuregui, E., 1988.** *Local wind and air pollution interaction in the Mexico basin.* Atmosfera 1:131–140 pp.
- ✚ **Jáuregui, E. y Luyando, E., 1999.** *Global radiation attenuation by air pollution and its effects on the thermal climate in Mexico City.* International Journal of Climatology 19(6):683-694 pp.
- ✚ **Jáuregui, E., 2000.** *El clima de la Ciudad de México.* Textos Monográficos: 4. Urbanización. Temas Selectos de Geografía de México. 131 pp.
- ✚ **Karaca F. y Camci F., 2010.** *Distant source contributions to PM10 profile evaluated by SOM based cluster analysis of air next term mass trajectory sets.* Atmospheric Environment 44(7): 892-899 pp.
- ✚ **Lee, B.K., Hong, S.H. y Lee, D.S., 2000.** *Chemical composition of the precipitation and wet deposition of the major ions on the Korean peninsula.* Atmospheric Environment 34: 563-575 pp.
- ✚ **López, C. M., 1978.** *Factores meteorológicos en la propagación de contaminantes del aire en La Habana.* Insmet, ACC, Cuba.
- ✚ **López, C., González, M., Collazo, Wallo, A., Cuesta, O., Sánchez, P., Manso, R., Imbert, C., Morejón, L.E. y Moreno, E., 1997.** *La deposición ácida atmosférica a nivel regional en Cuba y su contribución al riesgo de los ecosistemas terrestres.* Informe de proyecto CITMA, La Habana. 108 pp.
- ✚ **López, R., 2011.** *Relación entre los componentes iónicos de la lluvia, sus fuentes de emisión y condiciones meteorológicas estacionales. Aporte a la gestión de la calidad del aire en Cuba.* Tesis de Maestría en Gestión y Planificación Ambiental. Universidad de Chile. Chile.

- ✚ **Lojze-Pilot, M.D., Martin, J.M. y Morelli J., 1986.** *Influence of Saharan dust on the rain acidity and atmospheric input on the Mediterranean.* Nature 321: 427–428 pp.
- ✚ **Manual 850 Professional IC. 2009.** <http://www.ecs.umass.edu>.
- ✚ **Marín, D., 2003.** *Cambios a largo plazo en la Ionosfera y su relación con la actividad geomagnética.* Tesis de Doctor en Ciencias. Universidad Complutense de Madrid. España.
- ✚ **Martínez, A.P. y Romieu, I., 1997.** *Introducción al Monitoreo Atmosférico.* ECO/OPS, Metepec, Estado de México.
- ✚ **Martínez, E. y Díaz, Y., 2004.** *Contaminación atmosférica.* Universidad de Castilla, La Mancha. 13 pp.
- ✚ **Masters, G., 1998.** *Introduction to Environmental Engineering.* Prentice Hall. New Jersey, 1998. 59-60 pp.
- ✚ **Miller, J.M., 1981.** *A five-year climatology of five-day back trajectories from Barrow, Alaska.* Atmospheric Environment 15: 1401–1405 pp.
- ✚ **Moreno, A., 2016.** *Química atmosférica de compuestos orgánicos volátiles oxigenados.* Universidad de Castilla-La Mancha. España.
- ✚ **Moreno, E., 2017.** *Evaluación del impacto potencial en la calidad del aire por SO₂ en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) por la contribución de una fuente estacionaria.* Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química. UNAM, México.
- ✚ **Munn, R. E., 1969.** *Pollution wind-rose analysis.* Atmosphere 7: 97 – 105 pp.
- ✚ **Munn, R. E. y Bolin, B., 1971.** *Global air pollution meteorological aspects.* Atmospheric Environment 5: 362 – 402 pp.
- ✚ **NADP, 2004.** *National trends Network.* <http://nadp.sws.uiuc.edu>
- ✚ **Orza J.A.G., Cabello M., Lidón V. y Martínez J., 2011.** *Contribution of resuspension to particulate matter in mission levels in SE Spain.* Journal of Arid Environments.
- ✚ **Pradilla, E., y Márquez, L., 2004.** *Estancamiento económico, desindustrialización y terciarización informal en la Ciudad de México, 1980-2003, y potencial de cambio.*
- ✚ **Puente, M., Fernández-Olmo, I. y Irabien, A., 2010.** *Metodología para la determinación de metales traza en depósitos atmosféricos.* Madrid, España: CONARMA 10. Congreso Nacional de Medio Ambiente.
- ✚ **Ramos, L. E., González, C., Ballester, M., Mitrani, I., Llanes, M. T., Caymares, A., Aguilar, G., Campos, A., Rivero, A., Guevara, A. V., Limia, A., Paz, L. R., Lapinel,**

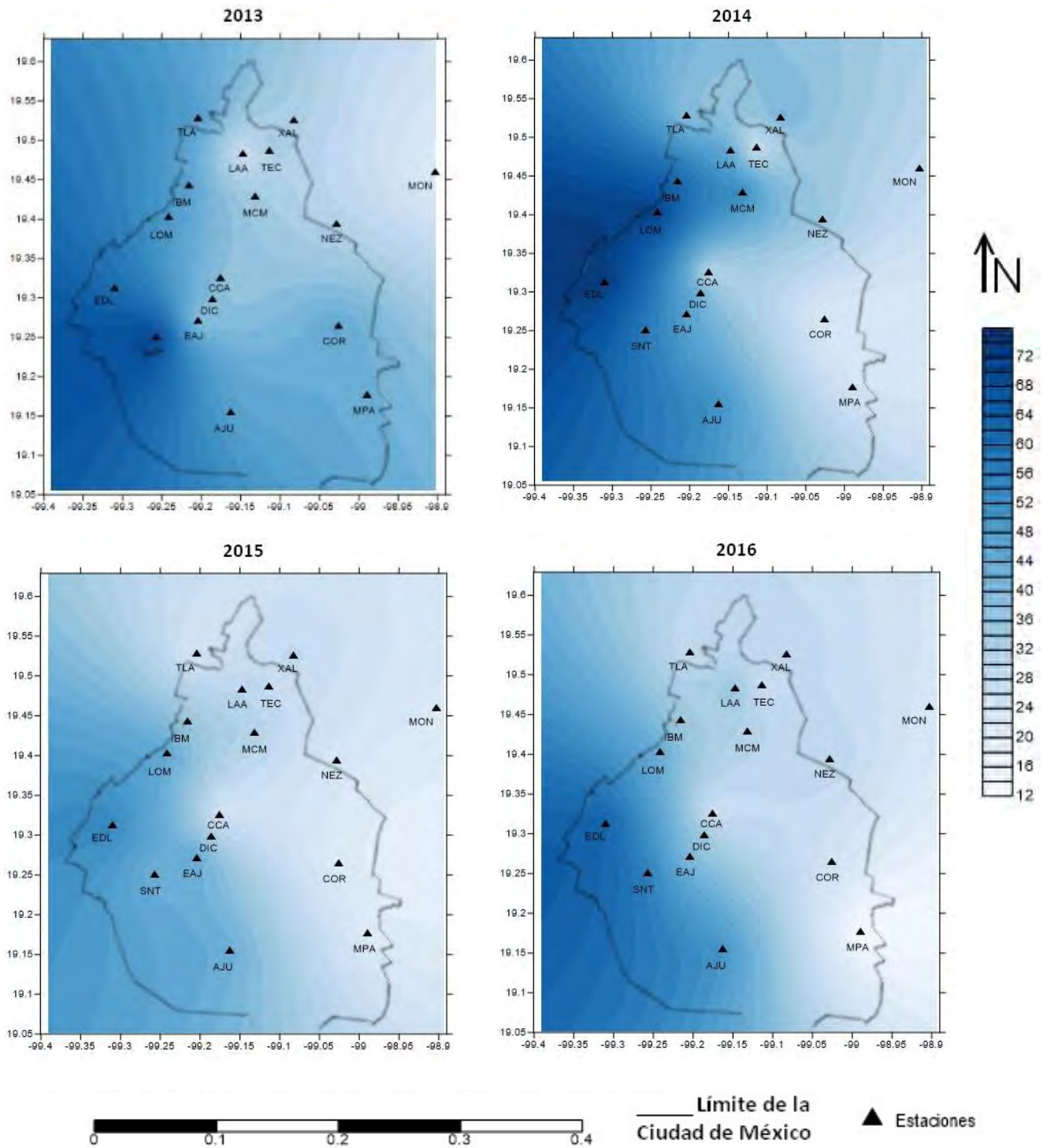
- B., Naranjo, L., Solano, O., Planos, E., Soltura, R. y Ortiz P.,1996. *Tabloide Elementos de Meteorología y Climatología*. Editorial Academia, La Habana, Cuba.
- ✚ Ren Z.H., Wan B.T., Yu T., Su F.Q., Zhang Z.G., Gao Q.X., Yang X.X., Hu H.L., Wu Y.H., Hu F. y Hong Z.X., 2004. *Influence of weather system of different scales on pollution boundary layer and the transport in horizontal current field*. Research of Environmental Sciences 17: 7–13 pp.
- ✚ Sakihama, H., Ishiki, M. y Tokuyama, A., 2008. *Chemical characteristics of precipitation in Okinawa Island, Japan*. Atmospheric Environment 42: 2330-2335 pp.
- ✚ Seinfeld, J.H.,1986. *Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution*. John Wiley and Sons. Estados Unidos. 738 pp.
- ✚ Seinfeld, J.H. y Pandis, S. N., 1997. *Atmospheric Chemistry and Physics, from Air Pollution to Climate Change*. John Wiley & Sons, New York.
- ✚ Seinfeld, J.H. y Pandis, S. N., 2006. *Atmospheric chemistry and physics. From air pollution to climate change*. New Jersey: John Wiley & Sons. 932-979 pp
- ✚ SEDEMA, 1994. *Programa precipitaciones ácidas en la ZMCM. Informe 1994*. Programa General de Prevención y Control de la Precipitación. RAMA. México.
- ✚ SEDEMA, 2004. *Inventario de Emisiones de la CDMX, 2004*. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Programas de Calidad del Aire e Inventarios de Emisiones. México.
- ✚ SEDEMA, 2006. *Informe Climatológico Ambiental 2006*. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo Atmosférico. Ciudad de México. México.
- ✚ SEDEMA, 2014. *Calidad del Aire en la Ciudad de México. Informe 2013*. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo Atmosférico. Ciudad de México. México.
- ✚ SEDEMA, 2015. *Inventario de Emisiones de la CDMX, 2014*. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Programas de Calidad del Aire e Inventarios de Emisiones. México.
- ✚ SEDEMA, 2016. *Calidad del Aire en la Ciudad de México. Informe 2015*. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo Atmosférico. Ciudad de México. México.
- ✚ SEDEMA, 2017. *Calidad del Aire en la Ciudad de México. Informe 2016*. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo Atmosférico.

Ciudad de México. México.

- # **Stohl, A., Forster, C., Frank, A., Seibert, P. y Wotawa, P., 2005.** *Technical Note: The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 6.2*. Atmos. Chem. Phys. 5: 2461-2474 pp.
- # **Tang, A., Zhuanga, G., Wang, Y., Yuana, H. y Suna, Y., 2005.** *The chemistry of precipitation and its relation to aerosol in Beijing*. Atmospheric Environment 39.
- # **Tiwari, S., Kulshresthab, U. y Padmanabhamurtyc, B., 2007.** *Monsoon rain chemistry and source apportionment using receptor modeling in and around National Capital Region (NCR) of Delphi, India*. Atmospheric Environment 41: 5595 – 5604 pp.
- # **US-EPA, 1994.** *Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems. Vol V. Precipitation Measurement Systems. Epa-600/R-94/038e*. U.S. Environmental Protection Agency., Research Triangle Park, NC.
- # **Wang, Y., Solberg, S., Yu, P., Myking, T., Vogt, R. y Du, S., 2007.** *Assessments of tree crown condition of two Masson Pine forest in the acid rain region in south China*. Forest Ecology and Management 242: 530-540 pp.
- # **Wang, F., et al. 2010.** *Identification of regional atmospheric PM10 transport pathways using HYSPLIT, MM5-CMAQ and synoptic pressure pattern analysis*. Environmental Modelling and Software. 25 (8): 927-934 pp.
- # **WMO, 1988.** *International Operations Handbook for Measurement of Background Atmospheric Pollution*. WMO-No. 491: 110 pp.
- # **WMO, 2004.** *Manual for the Gaw Precipitation Chemistry Programme*. WMO-No.160.
- # **Xia, C., Xie, Z. y Sun, L., 2010.** *Atmospheric mercury in the marine boundary layer along a cruise path from Shanghai, China to Prydz Bay, Antarctica*. Atmospheric Environment. 44: 1815-1821 pp.
- # <http://www.epa.gov/> (Consulta: octubre, 2016)
- # <http://www.aire.cdmx.gob.mx/> (Consulta: mayo 2017)
- # <http://nadp.sws.uiuc.edu/> (Consulta: octubre 2016, mayo 2017)
- # <http://www.inegi.org.mx/> (Consulta: noviembre 2017)
- # <http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT/> (Consulta: marzo 2018)
- # <http://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/narr/plothour.pl/> (Consulta: marzo 2018)
- # <http://www.nws.noaa.gov/glossary/> (Consulta: noviembre 2016)

ANEXOS

A.I. Distribución espacial de la precipitación en la ZMCM



A.II. Concentraciones ponderadas anuales de los iones de lluvia analizados en $\mu\text{Eq/L}$

2013	CE (mS/cm)	pH	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	H ⁺
AJU	23.00	4.43	3.64	64.95	4.03	7.06	19.89	29.75	37.60	60.54	36.97
CCA	20.41	4.94	4.58	85.31	3.27	3.73	32.61	16.58	41.01	61.15	11.49
COR	20.52	4.94	3.97	92.64	3.01	4.58	32.76	19.53	39.40	61.17	9.71
DIC	23.11	4.91	3.16	91.13	2.82	4.51	38.72	21.65	42.76	68.09	12.21
EAJ	21.47	4.76	4.40	74.55	2.63	5.48	30.29	21.64	38.73	62.59	17.40
EDL	19.66	4.92	4.07	70.03	3.81	6.04	38.31	13.27	44.77	59.58	11.89
IBM	24.10	5.28	4.81	104.56	2.99	5.20	52.81	17.37	49.70	83.84	5.24
LAA	23.86	5.13	5.19	95.85	3.37	5.03	50.35	18.33	46.93	82.07	7.37
LOM	20.28	5.01	4.24	83.17	2.87	4.22	35.84	14.48	44.43	62.62	9.71
MCM	22.68	5.15	4.21	101.41	2.72	5.18	46.97	19.14	47.02	77.06	7.10
MON	18.38	5.12	3.94	88.27	2.72	4.55	23.20	16.93	37.91	50.97	7.60
MPA	21.49	4.62	3.36	85.22	3.69	4.60	25.94	31.09	38.37	66.84	23.84
NEZ	23.64	5.47	3.42	112.91	3.29	4.46	41.29	20.01	48.43	75.13	3.38
SNT	20.46	4.77	3.57	63.34	2.23	5.48	26.66	23.08	32.74	55.99	16.93
TEC	20.39	5.04	3.57	85.24	4.34	4.71	35.51	18.41	37.42	66.61	9.15
TLA	20.31	5.15	2.84	85.83	2.26	4.61	40.66	11.96	37.20	70.14	7.00
XAL	22.71	5.40	4.48	104.45	2.74	5.66	49.23	17.57	42.91	77.64	3.94

2014	CE ($\mu\text{S/cm}$)	pH	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	H ⁺
AJU	22.69	4.56	3.55	55.62	1.31	1.94	21.66	13.06	33.97	57.61	27.40
CCA	19.04	5.07	3.03	76.11	1.33	2.42	32.43	12.12	42.15	56.47	8.50
COR	21.27	5.06	4.57	95.17	1.96	1.94	31.10	13.01	42.96	63.02	8.81
DIC	18.59	5.24	5.70	75.78	2.07	1.99	34.07	10.59	40.22	57.30	5.70
EAJ	19.47	4.95	6.54	70.74	2.09	2.22	35.41	13.07	42.93	58.62	11.32
EDL	15.90	4.95	5.11	53.49	1.83	2.31	25.49	9.17	34.39	44.39	11.26
IBM	21.33	5.14	8.09	85.01	3.04	3.35	52.53	10.46	49.27	70.24	7.21
LAA	19.98	5.16	6.25	86.83	2.19	3.33	38.34	12.28	45.47	65.11	6.96
LOM	18.99	4.97	4.44	75.34	1.62	1.94	36.95	8.99	42.35	59.62	10.65
MCM	19.82	5.41	5.04	90.10	1.84	2.75	37.60	11.58	40.80	61.41	3.88
MON	21.15	5.03	4.65	98.02	3.03	3.03	32.38	10.44	44.16	66.58	9.43
MPA	20.21	4.73	3.58	78.45	2.10	1.82	26.33	12.66	40.16	61.78	18.63
NEZ	19.10	5.80	5.56	94.40	2.24	1.95	30.98	11.54	39.82	60.07	1.60
SNT	17.20	4.98	8.65	58.21	2.97	1.90	25.38	11.20	34.80	50.46	10.36
TEC	17.67	5.60	5.05	85.37	3.63	2.19	35.63	11.12	40.69	56.94	2.52
TLA	21.88	5.35	24.24	84.99	1.53	5.23	45.90	11.53	44.29	68.94	4.42
XAL	20.76	6.04	6.79	95.03	2.43	3.70	48.94	13.05	47.12	68.32	0.90

2015	CE (mS/cm)	pH	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	CL ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	H ⁺
AJU	17.96	4.85	4.86	59.96	2.30	5.98	19.54	10.01	32.18	53.67	0.58
CCA	25.68	4.89	3.15	95.65	2.04	2.13	41.44	9.68	57.36	77.14	12.97
COR	27.69	4.68	5.16	93.26	3.08	6.30	30.79	15.57	41.02	78.12	21.02
DIC	26.58	4.92	5.62	103.93	3.28	5.89	39.98	11.30	59.15	79.64	12.03
EAJ	27.60	4.82	10.35	98.76	2.31	5.66	41.35	13.01	56.49	84.46	15.29
EDL	22.87	4.76	5.45	69.54	2.03	5.45	32.93	9.47	44.48	64.82	17.30
IBM	35.11	4.78	6.74	122.84	2.62	6.58	69.95	14.97	71.31	111.32	16.61
LAA	27.86	5.06	5.81	104.67	2.61	6.56	58.03	12.73	59.87	93.21	8.76
LOM	28.22	4.73	5.73	90.80	2.90	6.62	42.50	11.86	54.38	80.58	18.67
MCM	31.19	5.06	6.15	130.88	4.86	6.86	56.91	13.59	62.74	97.92	8.72
MON	25.56	4.69	4.31	88.13	2.12	6.35	28.56	15.26	41.70	72.86	20.45
MPA	24.83	4.66	5.44	76.26	2.27	5.77	25.63	15.25	36.74	69.99	21.90
NEZ	35.03	5.21	9.74	155.30	9.32	6.95	61.55	21.25	64.81	115.91	6.12
SNT	18.61	5.31	4.42	74.37	4.96	6.92	29.22	8.31	40.16	61.52	4.92
TEC	25.92	5.17	4.71	107.93	4.87	5.55	43.82	10.61	54.79	78.01	6.73
TLA	28.48	4.86	12.98	91.92	4.09	5.84	46.25	14.07	51.66	90.08	13.90
XAL	28.76	4.89	8.34	102.48	2.79	6.88	52.26	15.13	51.97	92.70	12.74

2016	CE (mS/cm)	pH	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	CL ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	H ⁺
AJU	16.8759118	5.12	4.95	63.23	1.80	1.49	24.02	7.63	31.02	55.04	7.64
CCA	20.9181744	5.15	-0.45	81.90	1.00	2.66	55.24	6.54	42.80	66.14	7.15
COR	22.573575	5.23	6.01	93.12	2.29	2.70	33.62	9.37	44.42	73.61	5.90
DIC	21.7913123	5.05	5.41	86.45	1.55	1.33	31.98	8.35	41.99	63.36	8.82
EAJ	16.9990148	5.08	3.92	66.92	1.10	1.17	28.23	8.55	35.76	56.98	8.40
EDL	17.8713517	5.22	4.91	63.30	2.28	0.73	39.70	6.09	36.11	54.98	5.96
IBM	27.1994697	5.52	7.27	114.15	1.90	3.34	60.42	8.82	58.69	93.26	3.03
LAA	23.2893425	5.74	4.42	103.79	2.48	2.28	48.85	5.75	48.43	80.73	1.82
LOM	22.6397019	5.25	6.93	88.24	1.85	2.43	49.69	8.92	48.18	69.33	5.58
MCM	23.5035394	5.71	7.93	99.11	2.78	3.50	50.37	9.26	45.68	77.60	1.94
MOM	19.4203499	5.82	4.20	92.71	2.16	1.60	28.28	5.94	41.09	60.98	1.52
MPA	20.7881649	4.91	5.08	73.45	2.76	2.00	24.83	11.77	34.41	61.91	12.34
NEZ	25.4830026	5.65	7.35	119.30	3.47	3.36	43.51	8.25	46.66	86.67	2.25
SNT	16.8905502	5.25	3.51	59.98	5.16	2.78	29.23	7.61	32.82	50.95	5.68
TEC	23.6165721	5.40	6.82	100.06	6.82	3.92	44.81	7.79	50.56	78.15	3.43
TLA	23.0081737	5.40	5.77	95.66	1.20	1.85	43.25	8.28	43.15	80.36	4.00
XAL	21.3551149	5.78	6.57	95.61	2.39	2.04	42.24	6.70	40.57	72.27	1.65

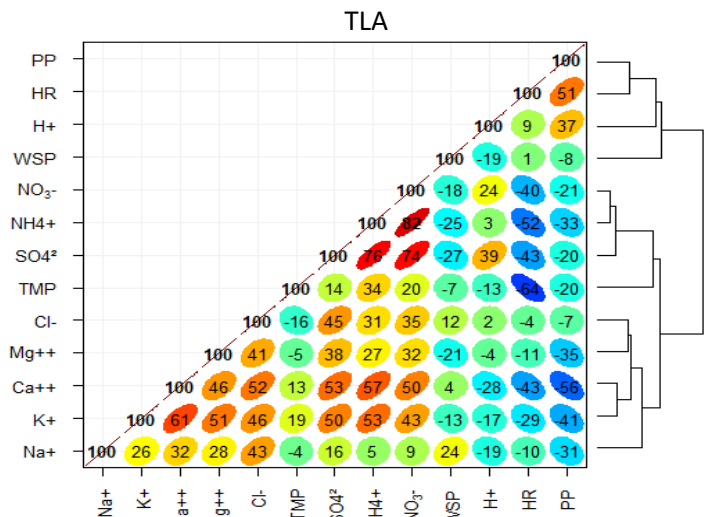
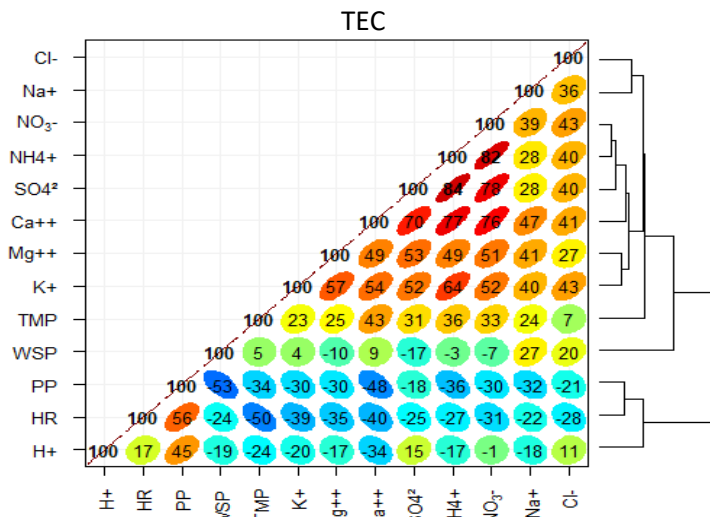
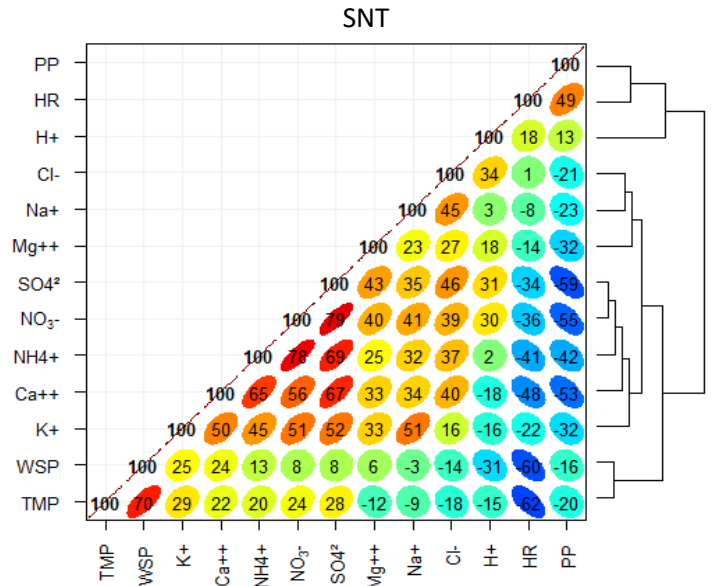
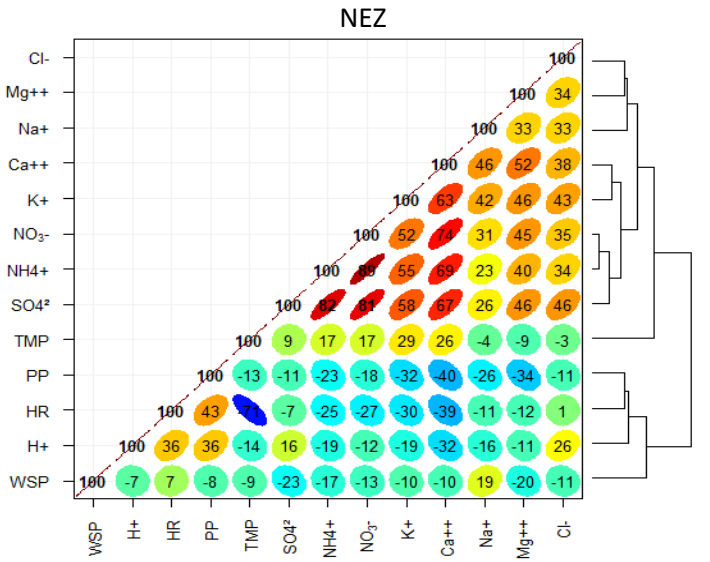
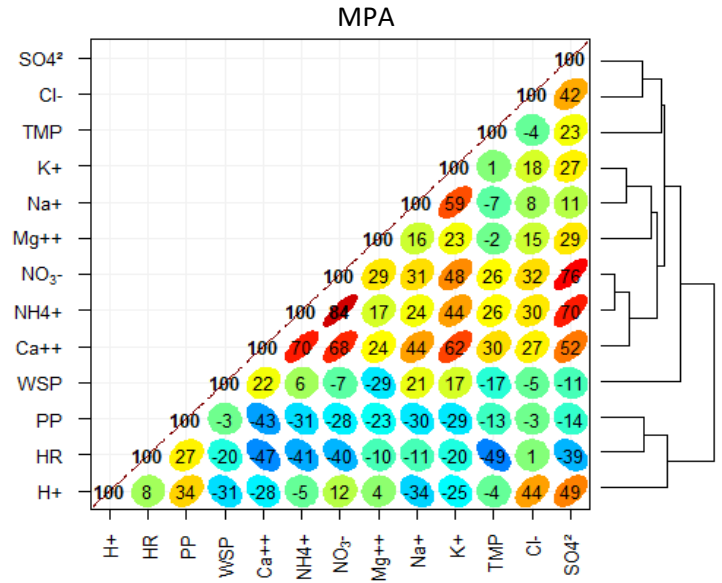
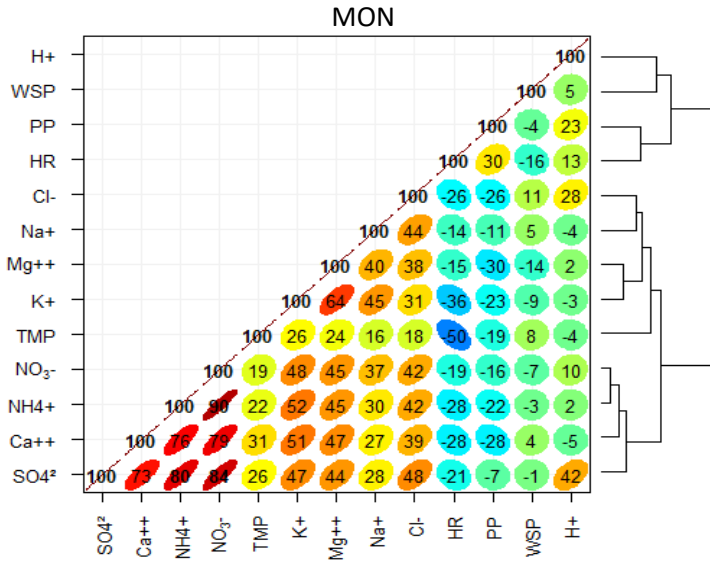
A.III. Acumulado anual del depósito de los iones de lluvia analizados en kg/ha

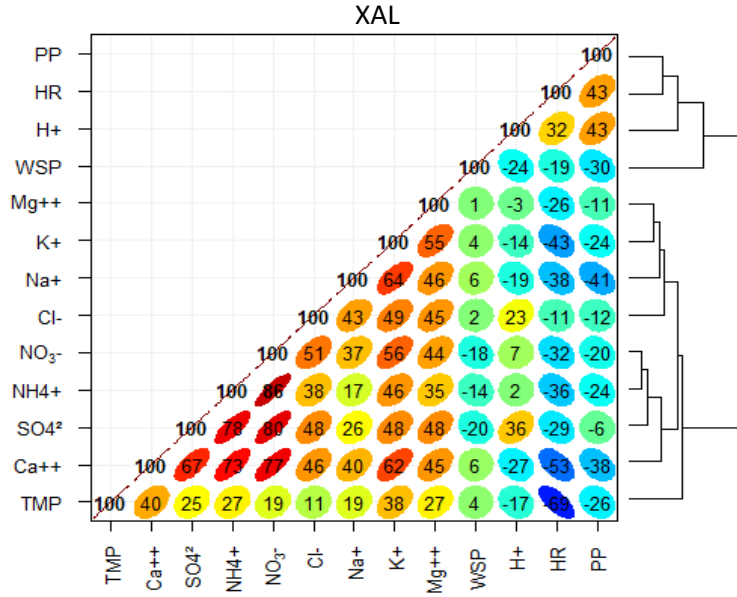
2013	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
AJU	12.85	28.44	35.45	1.02	14.26	1.92	1.05	4.85
CCA	4.34	18.81	21.71	0.78	11.36	0.95	0.33	4.82
COR	6.43	22.73	27.32	0.85	15.51	1.09	0.52	6.10
DIC	6.35	21.97	27.09	0.60	13.59	0.92	0.45	6.42
EAJ	7.37	23.10	28.90	0.97	12.91	0.99	0.64	5.83
EDL	6.82	34.44	39.88	1.26	16.52	1.86	0.87	7.81
IBM	5.96	29.88	39.02	1.07	18.25	1.13	0.61	10.24
LAA	3.96	17.75	24.03	0.73	10.53	0.80	0.37	6.14
LOM	5.73	30.78	33.58	1.09	16.73	1.25	0.57	8.01
MCM	5.85	24.66	31.12	0.84	15.47	0.90	0.54	7.84
MON	2.98	11.71	12.18	0.45	7.91	0.53	0.28	2.31
MPA	7.96	17.21	23.21	0.56	11.10	1.04	0.40	3.75
NEZ	5.07	21.48	25.81	0.56	14.54	0.92	0.39	5.91
SNT	7.32	18.20	24.09	0.74	10.22	0.78	0.60	4.78
TEC	5.52	19.66	27.09	0.70	13.00	1.44	0.48	6.02
TLA	4.22	22.99	33.56	0.65	15.40	0.88	0.56	8.11
XAL	5.13	21.92	30.71	0.85	15.49	0.88	0.57	8.11

2014	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ₂ ⁺	Ca ²⁺
AJU	4.89	22.53	29.59	0.87	10.71	0.55	0.25	4.64
CCA	3.45	21.28	22.08	0.57	11.16	0.42	0.24	5.28
COR	2.32	13.57	15.41	0.54	8.73	0.39	0.12	3.17
DIC	3.73	25.13	27.72	1.32	13.75	0.82	0.24	6.87
EAJ	5.36	31.20	32.98	1.76	14.93	0.96	0.32	8.30
EDL	5.61	37.25	37.22	2.05	16.82	1.25	0.49	8.91
IBM	5.13	42.83	47.28	2.61	21.46	1.67	0.57	14.73
LAA	4.52	29.68	32.90	1.51	16.45	0.90	0.43	8.07
LOM	4.45	37.16	40.50	1.44	19.19	0.90	0.33	10.46
MCM	5.11	31.87	37.14	1.46	20.43	0.91	0.42	9.48
MON	2.34	17.55	20.49	0.69	11.31	0.76	0.24	4.15
MPA	2.70	15.18	18.08	0.50	8.61	0.50	0.13	3.21
NEZ	3.04	18.58	21.70	0.96	12.79	0.66	0.18	4.66
SNT	4.64	25.54	28.67	2.36	12.40	1.38	0.27	6.01
TEC	2.70	17.54	19.00	0.81	10.68	0.99	0.18	4.95
TLA	3.72	25.28	30.47	5.13	14.08	0.55	0.58	8.45
XAL	4.83	30.91	34.69	1.65	18.10	1.01	0.48	10.36

2015	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
AJU	3.66	20.63	26.64	1.16	11.16	0.93	0.75	4.04
CCA	2.65	27.44	28.57	0.60	13.29	0.73	0.49	6.40
COR	2.41	11.13	16.41	0.52	7.34	0.53	0.34	2.69
DIC	3.20	29.35	30.60	1.03	14.97	1.03	0.57	6.40
EAJ	3.85	29.27	33.88	1.99	14.86	0.76	0.57	6.91
EDL	4.09	33.66	37.98	1.53	15.28	0.97	0.81	8.04
IMB	4.16	34.70	41.94	1.22	17.36	0.80	0.63	10.98
LAA	3.10	25.51	30.75	0.92	12.95	0.70	0.55	7.98
LOM	4.13	33.17	38.05	1.30	16.08	1.11	0.79	8.36
MCM	3.49	28.23	34.11	1.03	17.10	1.38	0.60	8.26
MON	2.71	12.95	17.51	0.50	7.94	0.42	0.39	2.86
MPA	2.74	11.56	17.05	0.64	6.97	0.45	0.36	2.60
NEZ	3.82	20.39	28.23	1.14	14.18	1.85	0.43	6.25
SNT	2.11	17.82	21.14	0.73	9.58	1.39	0.60	4.18
TEC	2.36	21.38	23.57	0.68	12.23	1.20	0.42	5.52
TLA	2.73	17.57	23.71	1.64	9.07	0.88	0.39	5.07
XAL	3.52	21.20	29.27	1.26	12.14	0.72	0.55	6.88

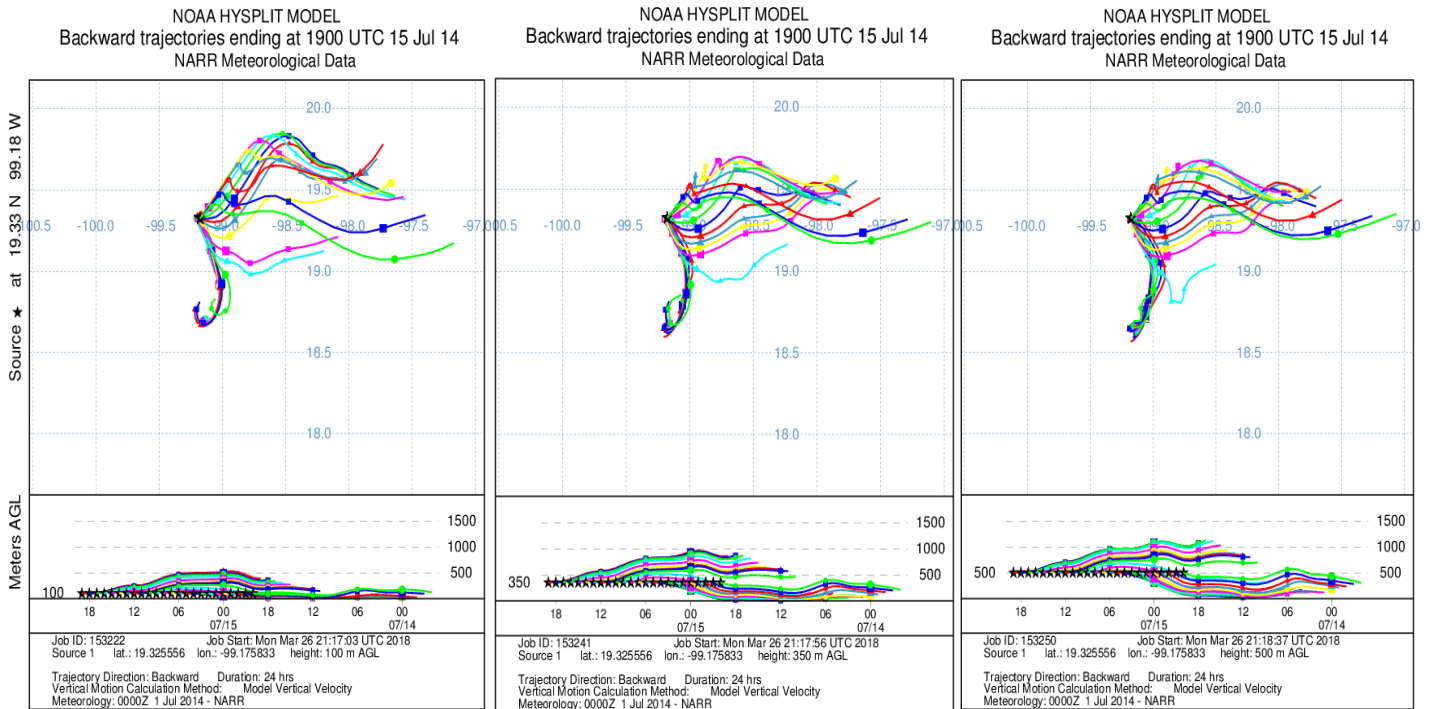
2016	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
AJU	3.26	23.24	31.92	1.37	13.75	0.22	0.85	5.81
CCA	1.96	21.84	26.13	0.21	12.13	0.27	0.33	9.09
COR	1.82	15.11	19.38	0.76	9.20	0.18	0.49	3.69
DIC	2.42	21.29	24.87	1.02	12.73	0.13	0.50	5.23
EAJ	3.08	22.57	27.84	0.92	12.26	0.15	0.44	5.75
EDL	2.71	28.10	33.12	1.42	14.30	0.11	1.12	9.96
IMB	2.18	25.36	31.20	1.17	14.32	0.28	0.52	8.42
LAA	1.37	20.24	26.12	0.69	12.59	0.19	0.65	6.59
LOM	3.02	28.54	31.79	1.52	15.17	0.28	0.69	9.49
MCM	2.48	21.40	28.14	1.38	13.48	0.32	0.82	7.61
MON	0.87	10.57	12.14	0.40	6.92	0.08	0.35	2.35
MPA	1.35	6.91	9.63	0.38	4.28	0.08	0.35	1.61
NEZ	1.59	15.74	22.63	0.92	11.68	0.22	0.74	4.73
SNT	3.27	24.71	29.70	0.98	13.11	0.41	2.45	7.10
TEC	1.60	18.21	21.79	0.91	10.46	0.28	0.44	5.21
TLA	2.20	20.05	28.90	0.99	12.90	0.17	0.35	6.48
XAL	1.62	17.23	23.75	1.03	11.79	0.17	0.64	5.79



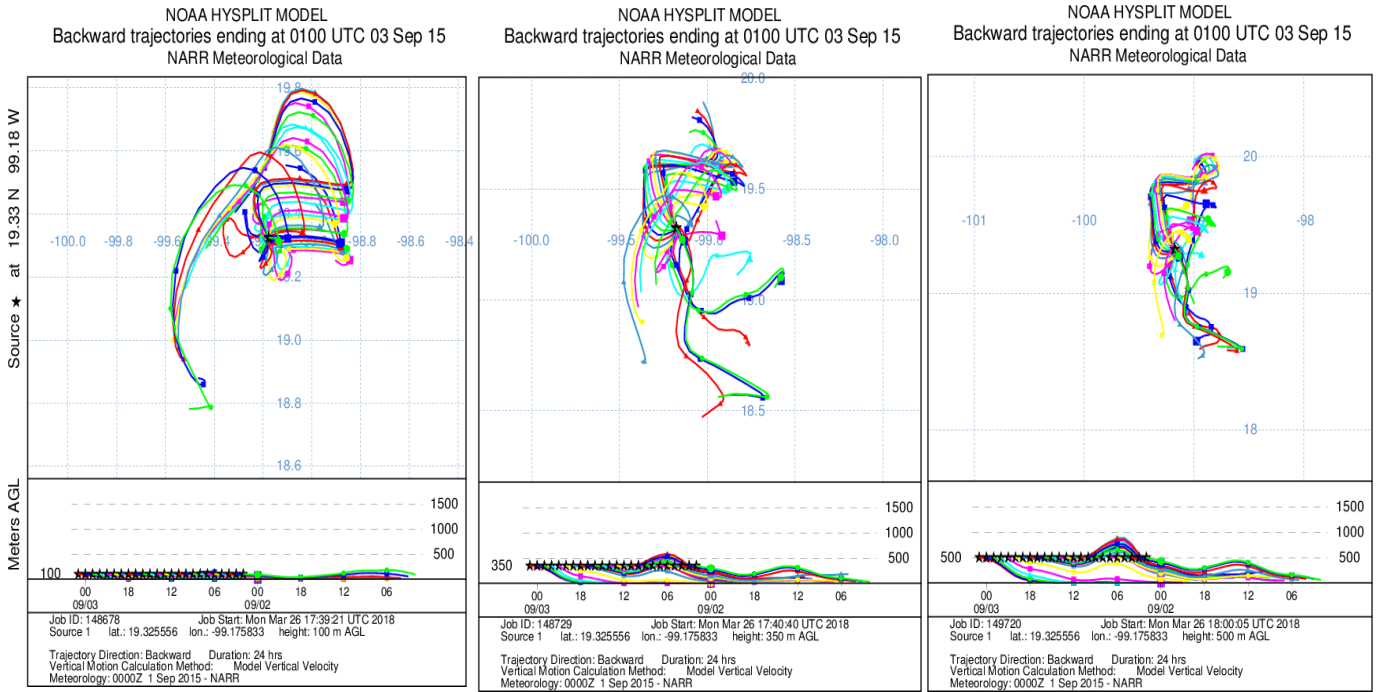


A.V. Trayectorias de retroceso con el modelo HYSPLIT

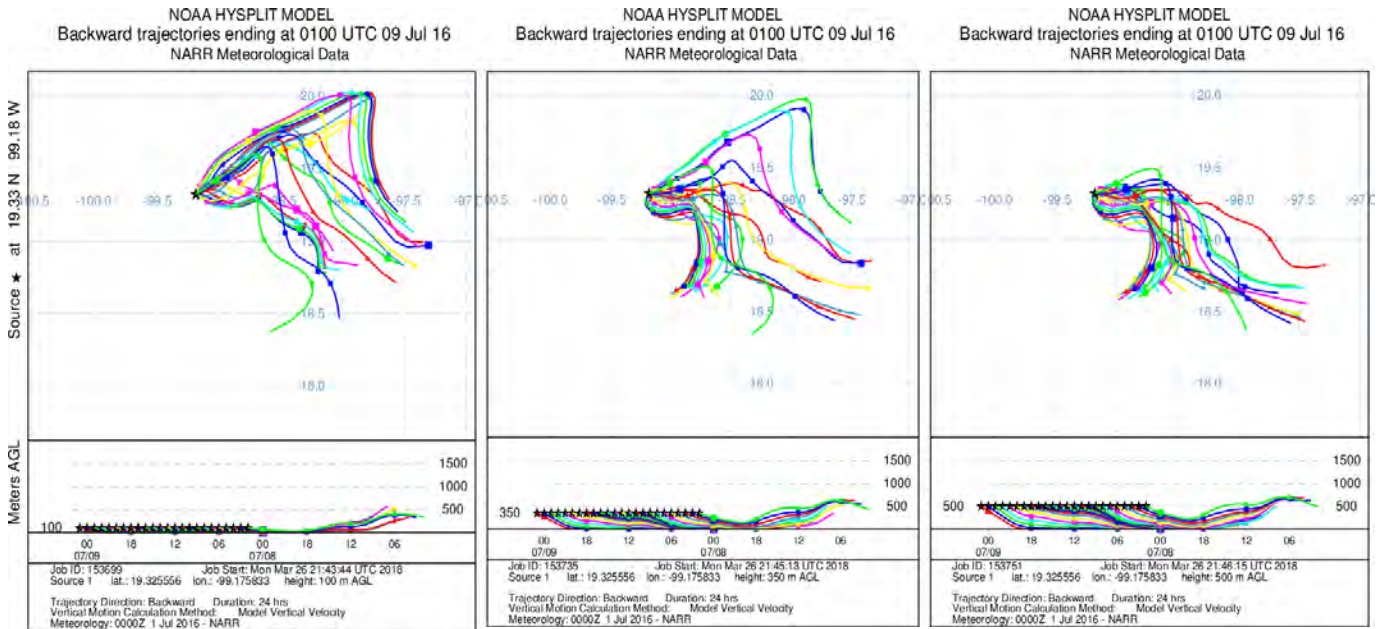
15 de julio del 2014 19 UTC. Evento ácido



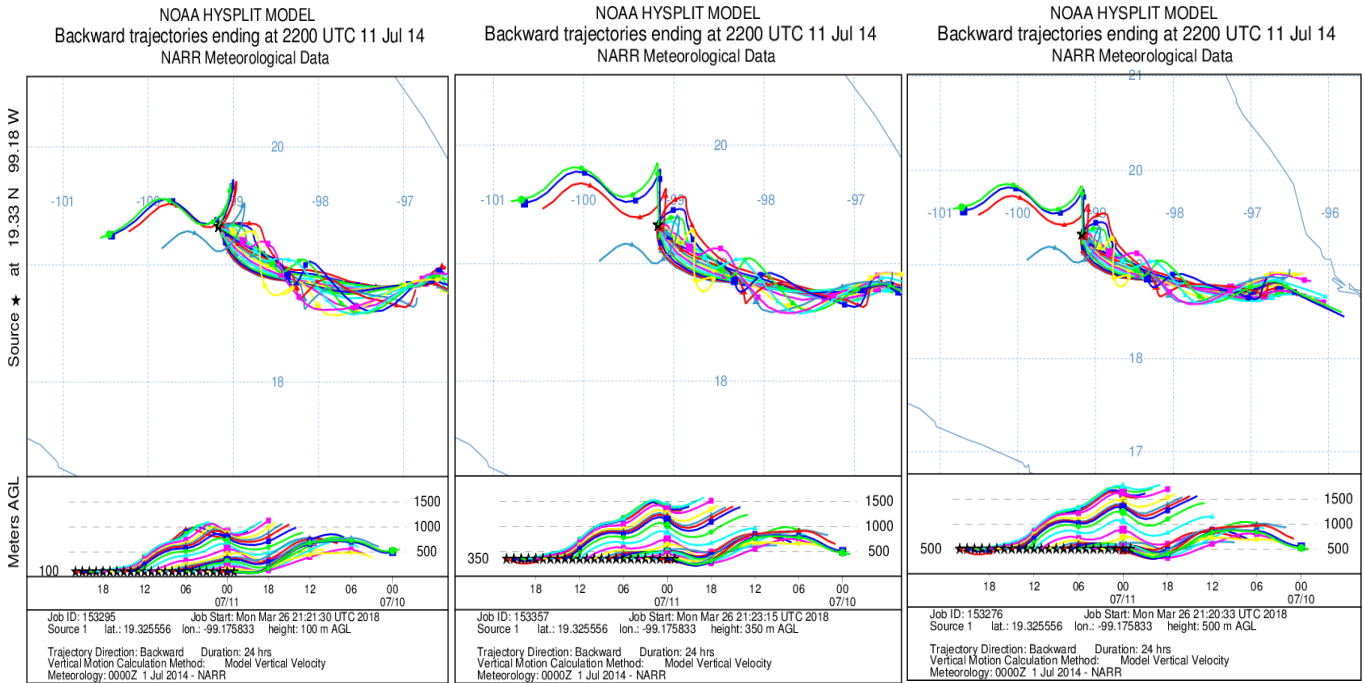
3 de septiembre de 2015 a las 01.00 UTC. Evento ácido



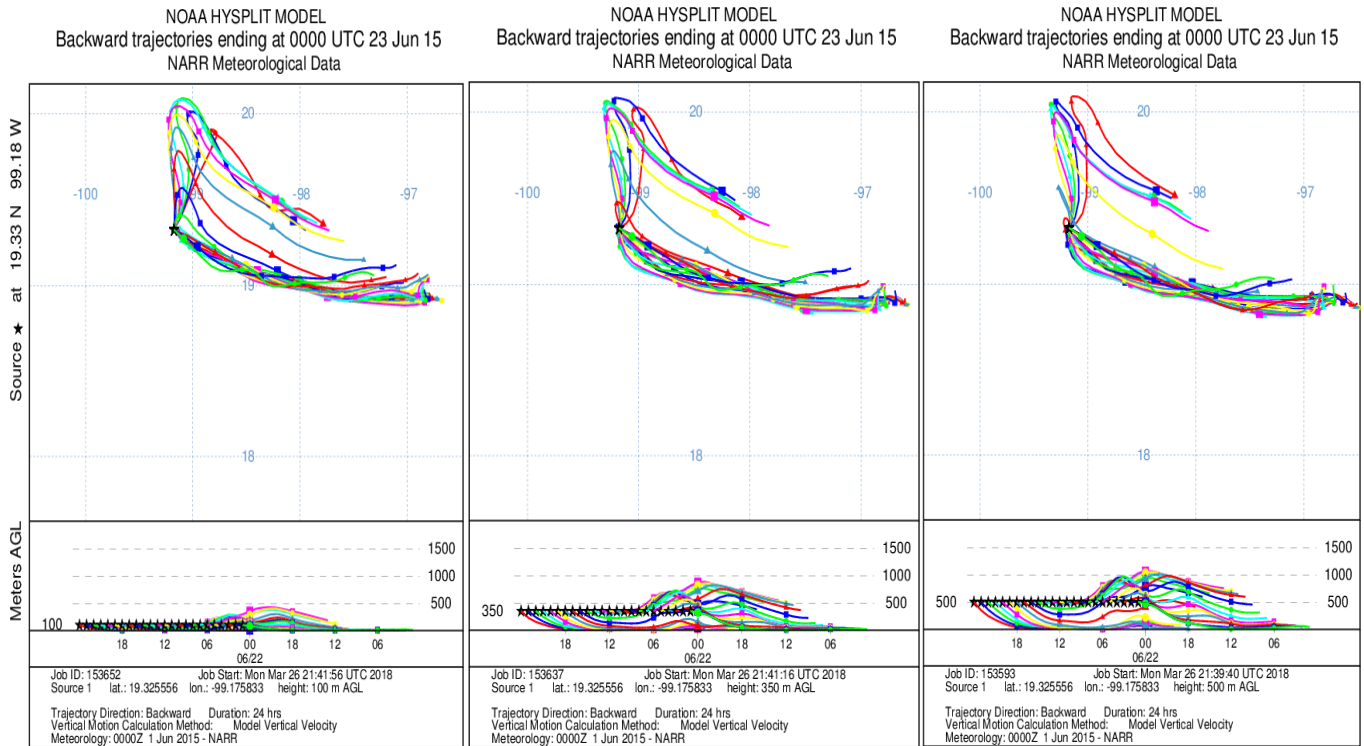
9 de julio de 2016 a las 01.00 UTC. Evento ácido.



11 de julio de 2014 a las 22.00 UTC. Evento alcalino.



23 de junio de 2015 a las 00.00 UTC. Evento Alcalino.



25 de julio de 2016 a las 02.00 UTC. Evento Alcalino.

