



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN  
INGENIERÍA**

**“LLUVIA ÁCIDA EN LA ZONA METROPOLITANA  
DE LA CIUDAD DE MÉXICO. EVALUACIÓN Y  
TRASCENDENCIA”**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRA EN INGENIERÍA**

AMBIENTAL - AIRE

P R E S E N T A :

**Q.A. ANA LUISA ALARCÓN JIMÉNEZ**

TUTOR:

**DR. HUMBERTO BRAVO ALVAREZ**

2012



## **JURADO ASIGNADO:**

Presidente: DR. GENESCÁ LLONGUERAS JUAN  
Secretario: M. C. FUENTES GEA VICENTE  
Vocal: DR. BRAVO ÁLVAREZ HUMBERTO  
1er. Suplente: DR. PARAMO FIGUEROA VICTOR  
2do. Suplente: DR. AGUILAR MÁRQUEZ ARMANDO

Lugares donde se realizó la Tesis:

SECCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL - CENTRO DE CIENCIAS DE LA  
ATMÓSFERA - UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

RED DE DEPÓSITO ATMOSFÉRICO – SISTEMA DE MONITOREO ATMOSFÉRICO  
DEL GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL.

**TUTOR DE TESIS**  
**DR. HUMBERTO BRAVO ALVAREZ**

---

**FIRMA**

## *AGRADECIMIENTOS*

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por su apoyo generoso durante mi formación académica, a través de sus diversas instancias y personal académico.

Al Centro de Ciencias de la Atmósfera, y muy en especial a la Sección de Contaminación Ambiental por integrarme a su grupo de trabajo y darme la oportunidad de crecer.

Al programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológicos (PAPIIT), UNAM, Proyectos: PAPIIT IX104404 y PAPIIT IN105205.

A mi Tutor, Dr. Humberto Bravo Álvarez, por sus valiosas aportaciones y consejos para la realización de esta Tesis. Gracias por las oportunidades y la confianza depositada en mí.

A los integrantes de mi comité tutorial, M. en C. Vicente Fuentes Gea, Dr. Armando Aguilar, Dr. Víctor Hugo Páramo y Dr. Juan Genescá Longueras, por sus valiosas observaciones y aportaciones, a este trabajo.

Al Dr. Rodolfo Sosa Echeverría por su apoyo, conocimiento y observaciones brindadas a este trabajo.

Al Dr. Javier Trujeque, Dr. Jonathan Kahl y Dr. Víctor Magaña por sus valiosas observaciones y recomendaciones.

A M en I. Mónica Sánchez Palomera y M en I. Adrián Marín Hernández, por su apoyo en el diseño de Mapas de distribución y trayectorias del modelo HYSPLIT.

Al Biol. Pablo Sánchez Álvarez por su colaboración y apoyo en este trabajo.

A la Red de Depósito Atmosférico (REDDA), al Director general de gestión de calidad del aire, Dr. Víctor Hugo Páramo Figueroa, A Q. Armando Retama Hernández, M. en I. Olivia Rivera Hernández, Ing. Alejandro Campos Díaz por las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo. Así como a los Técnicos Raúl Jesús Amador Calderón, Antonio Silva Hernández, Gabriel Elías Castro y Jorge Alberto Rodas Rivera, por su ayuda en la colección, manejo de cadena de custodia, traslado de muestras y medición de parámetros en campo.

A QFB. María del Carmen Torres, Q. Roberto Larino Gaspariano, estudiante Verónica Néquiz Castillo y QFB. Rocío Benítez Bautista, por su colaboración en el análisis de Cromatografía HPLC y medición de parámetros fisicoquímicos, durante las campañas de muestreo 2008 y 2009.

Agradezco a QFB. Salomón Santa María, IQ. Gilberto Fuentes García, IQ. Jorge Santa Cruz Morhy, QFB. Carmen Ramírez y Ramírez, QFB. Laura Becerril Rangel, por su apoyo en los análisis de pH y conductividad

## DEDICATORIAS

A mis Padres, cuyo amor, confianza y apoyo me han ayudado a crecer como persona. Gracias *"Nany"*, por estar con los brazos abiertos cuando más te necesito y ayudarme a levantar para volver a comenzar. Gracias *"Taty"*, por tu apoyo incondicional, tu paciencia y amor, éste año, me enseñaste que, ¡Nunca es tarde!.

A mi *Mamá Chiquita*, porque en cada logro y cada paso firme que he dado, siempre has ido conmigo de la mano. Gracias por tu cariño y apoyo, "Mis logros son tuyos".

A *Iván, Fer's, Edgar y Kury*, cuyo cariño y apoyo me ayudan a ser cada día mejor. Espero en un futuro no muy lejano, ser testigo de sus logros. Siempre estoy orgullosa de ustedes.

A mis amigos de la maestría, con quienes compartí muy buenos momentos en mis días de estudiante.

A mis amigos y compañeros de la Sección de Contaminación Ambiental, por su apoyo y colaboración en mis jornadas de trabajo durante el análisis de muestras.

Gracias: Noé, Jeny, Yorch, Olguita, Juanito Botargas, Gabitita, Adrián, Ely, Gil, Eva, Pavel, Vale, Julio, Roelof Van, Sandy, Bety, Viny, Roberto, Ramón, Candi, Alex, Hiram, Iván, Nora y Kike... por siempre estar.

"In memoriam to Kikin"

"La Niña del Aire"

# ÍNDICE

	<b>Pág.</b>
Relación de figuras	i
Relación de tablas	v
Glosario	vii
Resumen	viii
<b>CAPÍTULO 1</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b>	
1.1	2
1.2	4
1.3	4
<b>CAPÍTULO 2</b>	
<b>ANTECEDENTES</b>	
2.1	7
2.2	10
2.2.1	10
2.2.1	12
2.3	13
2.3.1	14
2.3.2	19
2.3.2.1	19
2.3.2.2	20
2.4	21
2.5	23
2.5.1	25
2.6	27
2.6.1	28
2.6.2	28
2.6.3	29

<b>CAPITULO 3</b>	<b>SITIO DE ESTUDIO</b>	
3.1	Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM)	31
3.1.1	Factores geográficos	31
3.1.2	Factores climáticos	33
3.1.3	Precipitación pluvial y humedad relativa	34
3.1.4	Viento	35
3.2	Estaciones de muestreo	36
3.2.1	Estrategia de muestreo	37
3.2.2	Selección del sitio	38
3.2.3	Criterios de ubicación del colector y pluviómetro	38
3.2.3.1	Requisitos regionales	38
3.2.3.2	Requisitos locales	39
<b>CAPÍTULO 4</b>	<b>METODOLOGÍA</b>	
4.1	Programa de aseguramiento de calidad y control de calidad (QA/QC) para el muestreo y análisis del depósito húmedo	43
4.2	Muestreo del depósito húmedo y seco	46
4.2.1	Preparación de material en el laboratorio de la Sección de Contaminación Ambiental del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM (SCA/CCA/UNAM)	47
4.2.2	Obtención y preservación de las muestras	47
4.2.3	Transporte de muestras al laboratorio de SCA/CCA/UNAM	49
4.3	Análisis químico de las muestras	49
4.3.1	Determinación de pH	50
4.3.2	Determinación de conductividad	50
4.3.3	Determinación de aniones y cationes por Cromatografía Líquida de Alta Eficiencia (CLAE)	50
4.3.3.1	Condiciones cromatográficas experimentales	51
4.3.4	Medición de la alcalinidad	52
4.4	Validación y Manejo de datos	53

**CAPÍTULO 5 RESULTADOS**

5.1	Determinación de pH	55
5.1.1	Zona Noreste (NE)	57
5.1.2	Zona Noroeste (NOE)	61
5.1.3	Zona Centro (ZC)	64
5.1.4	Zona Suroeste (SOE)	67
5.1.5	Zona Sureste (SE)	70
5.2	Determinación de conductividad	73
5.2.1	Zona Noreste (NE)	73
5.2.2	Zona Noroeste (NOE)	75
5.2.3	Zona Centro (ZC)	76
5.2.4	Zona Suroeste (SOE)	77
5.2.5	Zona Sureste (SE)	79
5.3	Análisis de aniones y cationes	80
5.3.1	Determinación de aniones	80
5.3.1.1	Ion sulfato	81
5.3.1.2	Ion nitrato	86
5.3.1.3	Ion cloruro	89
5.3.2	Determinación de cationes	92
5.4	Componentes Principales	94
5.5	Asociaciones iónicas	98
5.5.1	Asociación de origen ácido	102
5.5.2	Asociación de origen agricultura /suelo	102
5.6	Tendencias	104
5.7	Cargas críticas de N y S	109

**CAPÍTULO 6 TRAYECTORIAS DE RETROCESO**

6.1	Fuentes locales de precursores de lluvia acida	116
6.2	Análisis de trayectorias	118



**CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Conclusiones	124
Recomendaciones	127

**CAPÍTULO 8 BIBLIOGRAFÍA** 130

**ANEXOS**

Eventos de deposito húmedo 2003-2009	a-g
Eventos com pH menor a 5.6	h-k
Trayectorias de retroceso por evento	l-q
Análisis de componentes principales por región	r-bb

## RELACIÓN DE FIGURAS

<b>CAPÍTULO 2</b>		<b>Pág.</b>
Fig. 2.1	“Principales fuentes de emisión de SO <sub>2</sub> en la ZMCM”	11
Fig. 2.2	“Distribución espacial del SO <sub>2</sub> en la ZMCM”	11
Fig. 2.3	“Principales fuentes de emisión de NO <sub>x</sub> en la ZMCM”	12
Fig. 2.4	“Distribución espacial de NO <sub>x</sub> en la ZMCM”	13
Fig. 2.5	“Formación de gotas de lluvia”	14
Fig. 2.6	“Química atmosférica del nitrógeno”	18
Fig. 2.7	“Formación de lluvia ácida por Rain Out”.	20
Fig. 2.8	“Formación de lluvia ácida por Wash Out”.	21
Fig. 2.9	“Colector convencional de Jarra abierta”	24
Fig. 2.10	“Colector automático de depósito Wet & Dry”	24
Fig. 2.11	“Cronología de los estudios sobre lluvia ácida en México”	27
 <b>CAPÍTULO 3</b>		
Fig. 3.1	“La Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM)”	32
Fig. 3.2	“Altitud de la región geográfica de la ZMCM”	32
Fig. 3.3	“Subclimas de la ZMCM”	34
Fig. 3.4	“Precipitación pluvial mensual promedio por región”	35
Fig. 3.5	“Comportamiento promedio del viento del año 2003-2006”	36
Fig. 3.6	Ubicación del colector y pluviómetro con respecto a objetos y estructuras	40
Fig. 3.7	Ubicación de las estaciones de muestreo de depósito húmedo y seco de la REDDA. En La ZMCM	41
 <b>CAPÍTULO 4</b>		
Fig. 4.1	“Protocolo de muestreo de depósito húmedo”	45
Fig. 4.2	“Operación del colector de lluvia automático”	46
Fig. 4.3	“Etiquetas de registro para muestras de Depósito húmedo”	48

## CAPÍTULO 5

Fig. 5.1	Eventos de depósito húmedo registrados en la campaña 2003-2009	56
Fig. 5.2	Precipitación pluvial por estación 2003-2009.	56
Fig. 5.3	Ubicación de las estaciones de muestreo de la Zona Noreste (NE)	57
Fig. 5.4	Distribución de los valores de pH ponderado mensual en la región Noreste	58
Fig. 5.5	Variación del valor de pH ponderado anual para las estaciones de la región Noreste durante la campaña de muestreo 2003-2009	60
Fig. 5.6	Ubicación de las estaciones de muestreo de la Zona Noroeste (NO)	61
Fig. 5.7	Distribución de los valores de pH ponderado mensual en la región Noroeste	62
Fig. 5.8	Variación del valor de pH ponderado anual para las estaciones de la región Noroeste durante la campaña de muestreo 2003-2009	63
Fig. 5.9	Ubicación de la estación de muestreo de la Zona Centro (ZC)	64
Fig. 5.10	Distribución de los valores de pH ponderado mensual en la región Centro	65
Fig. 5.11	Valores de pH ponderado anual de la Región Centro	66
Fig. 5.12	Ubicación de las estaciones de muestreo de la Zona Suroeste (SOE)	67
Fig. 5.13	Distribución de los valores de pH ponderado mensual en la región Suroeste	68
Fig. 5.14	Variación del valor de pH ponderado anual para las estaciones de la región Noreste durante la campaña de muestreo 2003-2009	69
Fig. 5.15	Ubicación de la estación de muestreo de la Zona Sureste (SE)	70
Fig. 5.16	Distribución de los valores de pH ponderado mensual en la región Sureste	71
Fig. 5.17	Variación del valor de pH ponderado anual para las estaciones de la región Sureste durante la campaña de muestreo 2003-2009	73
Fig. 5.18	Valores de conductividad ponderada anual en la región Noreste	75
Fig. 5.19	Valores de conductividad ponderada anual en la Región Noroeste	76
Fig. 5.20	Valores de conductividad ponderada anual en la región Centro	77

Fig. 5.21	Valores de conductividad ponderada anual en la región Suroeste	79
Fig. 5.22	Valores de conductividad ponderada anual en la región Sureste	80
Fig. 5.23	Abundancia relativa de aniones en muestras de depósito húmedo	82
Fig. 5.24	Valor media de ión sulfato ( $\mu\text{Eq/L}$ ) en muestras de depósito húmedo recolectadas durante el periodo de 2003-2009	84
Fig. 5.25	Distribución del ión sulfato en muestras de depósito húmedo colectadas durante el periodo de 2003-2009	85
Fig. 5.26	Variación del ión sulfato en muestras de depósito húmedo colectadas durante el periodo de 2003-2009	85
Fig. 5.27	Valor media de ión nitrato ( $\mu\text{Eq/L}$ ) en muestras de depósito húmedo recolectadas durante el periodo de 2003-2009	88
Fig. 5.28	Distribución del ión nitrato en muestras de depósito húmedo colectadas durante el periodo de 2003-2009	88
Fig. 5.29	Distribución anual en Kg/ha del ión nitrato en muestras de lluvia colectadas durante el periodo 2003-2009	89
Fig. 5.30	Valor de media de ión Cloruro determinado en muestras de depósito húmedo colectadas en el periodo 2003 – 2009	91
Fig. 5.31	Distribución del ion Cloruro en Kg/ha en muestras de depósito húmedo colectadas durante el periodo de 2003-2009	91
Fig. 5.32	Abundancia relativa de cationes en muestras de depósito húmedo	93
Fig. 5.33	Correlación Componentes I y II	96
Fig. 5.34	Correlación Componentes II y III	96
Fig. 5.35	Correlación Componentes I y II con estaciones de muestreo	97
Fig. 5.36	Contribución del ión $\text{H}^+$ , en la acidez de las muestras	102
Fig. 5.37	Porcentaje de especies de origen suelo en muestras de depósito húmedo colectadas en el periodo 2003 – 2009	103
Fig. 5.38	Posibles orígenes de las especies que constituyen las muestras de depósito húmedo colectadas en el periodo 2003 – 2009	103
Fig. 5.39	Variación anual de pH ponderado en la región Noreste	104
Fig. 5.40	Variación anual de pH ponderado en la región Noroeste	105
Fig. 5.41	Variación anual de pH ponderado en la región Suroeste	105

Fig. 5.42	Variación anual de pH ponderado en la región Sureste	105
Fig. 5.43	Variación de la concentración de sulfato periodo 2003-2009	106
Fig. 5.44	Variación de la concentración de nitrato periodo 2003-2009	106
Fig. 5.45	Variación de la concentración de NO <sub>x</sub> periodo 2003-2009	107
Fig. 5.46	Variación de la concentración de SO <sub>2</sub> periodo 2003-2009	107
Fig. 5.47	Producción anual del volcán Popocatepetl de SO <sub>2</sub> de 1995 a 2008	108

## **CAPÍTULO 6**

Fig. 6.1	Emisiones porcentuales de SO <sub>2</sub> de las Fuentes Móviles	116
Fig. 6.2	Emisiones porcentuales de NO <sub>x</sub> de las Fuentes Móviles	117
Fig. 6.3	Trayectorias de los eventos de lluvia ácida en la ZMCM. año 2003	119
Fig. 6.4	Trayectorias de los eventos de lluvia ácida en la ZMCM. Año 2004	119
Fig. 6.5	Trayectorias de los eventos de lluvia ácida en la ZMCM. año 2005	120
Fig. 6.6	Trayectorias de los eventos de lluvia ácida en la ZMCM. año 2005	120
Fig. 6.7	Trayectorias de los eventos de lluvia ácida en la ZMCM. Año 2007	121

## RELACIÓN DE TABLAS

### CAPÍTULO 4

Tabla 4.1 Condiciones cromatográficas experimentales para la determinación de aniones y cationes	52
--	----

### CAPÍTULO 5

Tabla 5.1 Número de muestras de depósito húmedo colectadas en la región NE durante la campaña de muestreo 2003-2009	58
Tabla 5.2 Variación del valor de pH ponderado para las estaciones de la Región NE durante la campaña de muestreo 2003-2009	59
Tabla 5.3 Número de muestras de depósito húmedo colectadas en la Región NO durante la campaña de monitoreo 2003-2009	62
Tabla 5.4 Variación del valor de pH ponderado anual para las estaciones de la región Noroeste (NO)	63
Tabla 5.5 Número de muestras de depósito húmedo colectadas en la Región Centro (C) durante la campaña de muestreo 2003-2009	65
Tabla 5.6 Variación del valor de pH ponderado para la estación de la Región Centro (C) durante la campaña de muestreo 2003 - 2009	66
Tabla 5.7 Número de muestras de depósito húmedo colectadas en la Región SO durante la campaña de monitoreo 2003-2009	68
Tabla 5.8 Variación del valor de pH ponderado para las estaciones de la Región Suroeste (SO) durante La campaña de muestreo 2003 – 2009	69
Tabla 5.9 Número de muestras de depósito húmedo colectadas en la Región Sureste durante la campaña de monitoreo 2003-2009	71
Tabla 5.10 Variación del valor de pH ponderado para las estaciones de la Región Sureste (SE)	72
Tabla 5.11 Valor de mediana de conductividad para la región Noroeste	74
Tabla 5.12 Valor de conductividad ponderada anual para muestras colectadas en la región Noreste	74
Tabla 5.13 Valor de mediana de conductividad para la Región Noroeste	75
Tabla 5.14 Valor de conductividad ponderada anual para muestras colectadas en la región Noreste	76
Tabla 5.15 Valor de Mediana de conductividad para la Región Centro	77

Tabla 5.16	Valor de conductividad ponderada anual para muestras colectadas en la región Noreste	77
Tabla 5.17	Valor de conductividad ponderada para la región Suroeste	78
Tabla 5.18	Valor de mediana de conductividad para la región Suroeste	78
Tabla 5.19	Valor de mediana de conductividad para la Región Sureste	79
Tabla 5.20	Valor de mediana de conductividad para la Región Sureste	79
Tabla 5.21	Concentración de ión sulfato en muestras de lluvia colectadas durante el periodo 2003-2009	83
Tabla 5.22	Concentración de ión nitrato en muestras de lluvia colectadas durante el periodo de 2003-2009	87
Tabla 5.23	Concentración de ion cloruro en muestras de lluvia colectadas durante el periodo 2003-2009	90
Tabla 5.24	Determinación de cationes en muestras de depósito húmedo de la Región Noreste	92
Tabla 5.25	Factores de correlación de Pearson aniones y cationes. Región Noreste	98
Tabla 5.26	Factores de correlación de Pearson aniones y cationes Región Noroeste	99
Tabla 5.27	Factores de correlación de Pearson aniones y cationes. Región Centro	100
Tabla 5.28	Factores de correlación de Pearson aniones y cationes. Región Suroeste	100
Tabla 5.29	Factores de correlación de Pearson aniones y cationes. Región Suroeste	101
Tabla 5.30	Deposición y carga critica de Nitrógeno	110
Tabla 5.31	Deposición y carga critica de Azufre	110
 <b>CAPÍTULO 6</b>		
Tabla 6.1	Principales Emisiones de los precursores de lluvia ácida en el Distrito Federal y Otros Estados (Ton/año)	117

## ABREVIATURAS

CCA – UNAM	Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México
CLAE	Cromatografía Líquida de Alta Eficiencia
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EPA	Environmental Protection Agency
GAW	Global Atmosphere Watch Precipitation Chemistry Program
GAWP	Global Atmosphere Watch Precipitation Chemistry Program
GDF	Gobierno del Distrito Federal
HPLC	High Performance Liquid Chromatographic
HYSPLIT	Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model
INE	Instituto Nacional de Ecología
NADP	National Deposition Acid Program
NOAA	National Oceanic Atmospheric Administration
NSWS	National Surface Waters Survey
PPAZMCM	Programa de Precipitaciones Ácidas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México PPAZMCM
RAMA	Red Automática de Monitoreo Atmosférico
REDDA	Red de Depósito Atmosférico
SCA	Sección de contaminación Ambiental
SEDUE	Subsecretaría de desarrollo Urbano y Ecología
SIMAT	Sistema de Monitoreo Atmosférico
SMA	Secretaría del Medio Ambiente
SPSS	Statistical Package for the Social Sciences
WMO	World Meteorological Organization
ZMCM	Zona Metropolitana de la Ciudad de México



## RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo titulado “*Lluvia Ácida en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM). Evaluación y trascendencia*” comprende un periodo de muestreo y análisis del depósito atmosférico húmedo, de 7 años consecutivos (2003 – 2009).

En esta investigación se determinó y evaluó la composición química de la deposición húmeda en 17 estaciones; 16 de ellas establecidas por la *Red de Depósito Atmosférico (REDDA)*, dentro del Distrito Federal y zonas conurbadas y una estación de monitoreo ubicada en el *Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México (CCA – UNAM)*. En todos los sitios de muestreo, se colectaron eventos de depósito húmedo con características ácidas (pH menor a 5.6), dicha acidez incrementó de Norte a Sur en la zona de estudio. La región Suroeste, presentó un valor promedio de pH ponderado en seis años (2003 -2009) de 4.41 mientras que la región Noreste presentó un valor promedio ponderado de 5.34 unidades.

Se evaluaron los parámetros fisicoquímicos de pH y conductividad, tanto en campo como en laboratorio así como la concentración de los iones inorgánicos solubles:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{Cl}^-$ , mediante la técnica analítica de *Cromatografía Líquida de Alta Eficiencia (CLAE)* o por sus siglas en inglés High Performance Liquid Chromatographic (HPLC). Los resultados mostraron que la concentración de ión  $\text{SO}_4^{2-}$  fue mayoritaria (60%) con respecto a los otros iones y que su asociación al ión hidronio incrementó en las estaciones de muestreo ubicadas al Suroeste de la ZMCM, alcanzando hasta un 30% en relación a la masa total de este ión.

La concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$  ( $\mu\text{Eq/L}$ ) determinada en las muestras de lluvia, alcanzó valores máximos en la región Norte. Debido a su concentración por los bajos volúmenes de lluvia colectados. Sin embargo, la distribución de  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{Cl}^-$  determinada en kilogramos por hectárea fue mayor en las estaciones ubicadas en la región Suroeste.

Se identificaron tres posibles orígenes de los componentes del depósito húmedo: el origen ácido, el origen marino y el enriquecimiento por aerosoles provenientes del suelo. La asociación de los iones  $\text{SO}_4^{2-}$  con respecto a los iones  $\text{H}^+$  mostró un máximo de 30% para la zona suroeste y un 10% para las otras áreas. Con respecto a la

neutralización con partículas y aerosoles provenientes del suelo, la contribución del ión sulfato, constituyó alrededor del 60%.

Para la obtención de muestras, se siguió un protocolo de muestreo y análisis recomendado por el Programa Nacional de Deposición Ácida (*National Deposition Acid*) (US-NADP, 2000) de los Estados Unidos y la Agencia de Protección Ambiental de Los Estados Unidos (*Environmental Protection Agency*) (US-EPA, 1994). Correspondiendo al Gobierno del Distrito Federal (GDF) la colección y cadena de custodia de las muestras de deposición húmeda en las 16 estaciones de muestreo y a la Sección de contaminación Ambiental (SCA), el análisis de las mismas.

Cabe mencionar que a partir del año 2009, el laboratorio de la Sección de Contaminación Ambiental forma parte de un programa de Estudios intercomparativos entre laboratorios a nivel mundial, bajo el programa "*Global Atmosphere Watch Precipitation Chemistry Program (GAW)*" de la *World Meteorological Organization (WMO)*.

Con la finalidad de evaluar las diferencias significativas del valor de pH en años consecutivos 2003-2009 por zona de muestreo (Norte, Sur, Este, Oeste), se realizó un análisis estadístico utilizando el programa *Statistical Package for the Social Sciences (SPSS)*.

Adicionalmente, se aplicó el modelo *HYSPLIT* utilizando trayectorias de retroceso, con la finalidad de identificar las posibles fuentes de emisión de los precursores que dieron origen a los eventos de lluvia ácida identificados. Las trayectorias obtenidas, muestran que la mayoría de los eventos de lluvia, provienen del Golfo de México, atraviesan los Estados de Puebla, Tlaxcala y la región Norte del Estado de México; estas trayectorias ayudan a comprender la incorporación de precursores emitidos por el volcán Popocatepetl, el arrastre eólico de suelo proveniente de Ecatepec, y la contribución de precursores generados por la refinería de Tula, Hidalgo.

## ABSTRACT

This paper "Acid Rain in the Metropolitan Area of Mexico City (MAMC). Evaluation and significance" included a period of sampling and analysis of wet atmospheric deposition for seven consecutive years (2003-2009).

This research identified and quantified the chemical composition of wet deposition at 17 stations, 16 of which were established by the Atmospheric Deposition Network (ADN) within the Federal District and conurbations and a monitoring station located in the Science Center of the Atmosphere of the National Autonomous University of Mexico (CCA - UNAM). In all sampling sites, Wet deposition events with characteristic acidic (pH less than 5.6), were collected and acidity increased from north to south in the study area. The Southwest region, presented a pH value weighted average in six years (2003 -2009) of 4.41 while the Northeast had a value of 5.34 units weighted average.

The physicochemical parameters of pH and conductivity were evaluated in both, field and laboratory as well as the concentration of inorganic ions soluble  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{Cl}^-$  by the analytical technique High Performance Liquid Chromatography (HPLC). The results showed that the concentration of  $\text{SO}_4^{2-}$  ion, was higher (60%) than the other ions, and hydronium increased in sampling stations located southwest of the Metropolitan Area, reaching up to 30% compared to the total mass of the ion.

$\text{SO}_4^{2-}$  and  $\text{NO}_3^-$  concentrations ( $\mu\text{Eq/L}$ ) determined in samples of rain, were higher in the North. Because these have low volumes,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  distributions and  $\text{Cl}^-$  (Kg/ha) was higher at stations located in the Southwest.

Three potential sources were identified: the acid source, origin marine and enrichment aerosols from the ground. The association of  $\text{SO}_4^{2-}$  ions over  $\text{H}^+$  ions showed a maximum of 30% to the southwest and 10% for the other areas. With regard to the neutralization with particulates and aerosols from the soil, the contribution of sulfate ion, was about 60%.

Sampling was followed by analysis, using protocol recommended by the National Acid Deposition Program (NADP) (US-NADP, 2000) and Environmental Protection Agency of the United States (US-EPA, 1994). The collection and custody of samples of wet

deposition in the 16 sampling stations corresponded to the Federal District Government (GDF) and the analysis of these to Section of Environmental Pollution (SCA),.

Signally from the year 2009, the laboratory of the Department of Environmental Pollution is part of a program of interlaboratory studies between laboratories worldwide, under the "Global Atmosphere Watch Precipitation Chemistry Program (GAW)" of the World Meteorological Organization (WMO).

the Statistical Package for Social Sciences (SPSS), was using To evaluate the significant differences of pH value in consecutive years 2003-2009 for sampling location (North, South, East, West),

Additionally, model HYSPLIT was applied using backward trajectories, to identify possible sources of emissions of precursors that gave rise to acid rain events identified. The trajectories obtained show that most rain events, from the Gulf of Mexico, crossing the states of Puebla, Tlaxcala and northern Mexico state; these trajectories help to understand the incorporation of precursors emitted by the volcano Popocatepetl The ground wind drag from Ecatepec, and the contribution of precursors generated by the refinery Tula, Hidalgo.

**CAPÍTULO I**  
**INTRODUCCIÓN**

## CAPÍTULO 1.

### INTRODUCCIÓN

#### 1.1 JUSTIFICACIÓN

La deposición húmeda y la deposición seca son dos procesos que gobiernan la transferencia de sustancias suspendidas en la atmósfera hacia la superficie. Si descienden al suelo y aguas superficiales por acción del viento o por acción de la fuerza de gravedad, se denomina depósito seco; mientras que, si desciende por efecto de algún tipo de precipitación meteorológica se denomina depósito húmedo (lluvia, niebla, nieve o granizo).

Desde la década de 1970, numerosos investigadores muestrean y analizan dichos depósitos atmosféricos y sus constituyentes químicos en el contexto de lluvia ácida y su relación con la atmósfera (Krupa 2002). Los nominativos lluvia ácida y depósito seco, se usaron indistintamente como depósitos húmedo y seco.

El nominativo “Lluvia ácida” es usado para describir aquella precipitación que presenta un  $\text{pH} < 5.6$  a diferencia de lo que comúnmente se define como solución ácida (aquella que posee un valor de  $\text{pH} < 7.0$ ), ésta definición considera que el agua presente en la atmósfera, en forma de pequeñas gotas, ya tiene cierta acidez debida a la formación natural del ácido carbónico.

El incremento de acidez en la lluvia, se debe a la presencia de ácidos fuertes: el ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) y el ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), que resultan de la mezcla de la humedad atmosférica con derivados del azufre y del nitrógeno, tales como el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) que son conocidos como sus precursores. Actualmente la lluvia ácida representa un problema potencial que incide de forma directa sobre todos los ecosistemas, materiales de construcción, etc.

La formación de la lluvia ácida no es inmediata, puede variar de horas a días debido a procesos de transporte, mezclado y transformación que ocurren en la atmósfera. Por esta razón, los lugares en los que se presenta este fenómeno pueden estar localizarse a cientos de kilómetros de la zona donde las nubes incorporaron a sus precursores; es por ello, que la determinación de su composición, asociada a la descripción de su transporte atmosférico, proporcionan una herramienta útil para identificar las posibles fuentes de emisión y sus receptores y finalmente poder establecer estrategias de control que permitan prevenir, minimizar y controlar las fuentes de emisión de sus precursores y disminuir sus efectos ambientales.

En la actualidad existe marcado interés en desarrollar estudios sobre los efectos de la lluvia ácida y el papel que juega en el deterioro de los materiales, especialmente en el caso de la conservación del patrimonio histórico y cultural (Bravo, 2000).

Es por ello que, en la Sección de Contaminación Ambiental (SCA) del Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), se mantiene un programa continuo de muestreo y análisis del depósito atmosférico húmedo y seco. En este contexto, en coordinación con el *Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT)* de la *Secretaría del Medio Ambiente (SMA)* del *Gobierno del Distrito Federal (GDF)*, desde 2002 se realiza un estudio sistemático del fenómeno de la lluvia ácida con la finalidad de identificar las zonas con mayor impacto dentro de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) por el fenómeno de la lluvia ácida, y a través de su especiación iónica, visualizar de forma indirecta la magnitud del impacto por precursores como el  $\text{NO}_2$  y el  $\text{SO}_2$ , y justificar así, la aplicación o mejoramiento de medidas de control en la emisión de sus precursores.

## 1.2 META

Evaluar las características de la deposición húmeda en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), la procedencia de sus precursores y su impacto.

## 1.3 OBJETIVOS

- Colectar el depósito húmedo, a través de las 17 estaciones que comprende la Red de Depósito Atmosférico (REDDA) y una estación control en Ciudad Universitaria (CU-CCA). Observando el protocolo de cadena de custodia.
- Cuantificar los principales cationes y aniones inorgánicos presentes en la precipitación pluvial, relacionando las concentraciones de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) y sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) con los iones hidronio ( $\text{H}^+$ ).
- Identificar las regiones de mayor impacto en la ZMCM por el fenómeno de la lluvia ácida.
- Evaluar la variación mensual y anual de la concentración ponderada de los iones solubles presentes en las muestras de lluvia ácida mediante métodos estadísticos.
- Identificar las regiones de origen de los precursores de lluvia ácida, mediante la modelación de trayectorias de retroceso.



**CAPÍTULO 2**  
**ANTECEDENTES**

## CAPÍTULO 2

### ANTECEDENTES

El crecimiento de la población y su concentración en zonas urbanas trae como consecuencia la demanda de más y mejores servicios, así como el empleo de tecnologías para lograr una mejor calidad de vida. Desafortunadamente, el desarrollo trae como consecuencia la contaminación de la atmósfera, el suelo y el agua, que se manifiesta en efectos negativos a la calidad de vida de los habitantes, tal y como ocurre en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM).

Actualmente la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) enfrenta serios problemas de deterioro ambiental, que se relacionan con factores físicos, económicos y sociales, lo que ha llevado a buscar indicadores de la calidad del aire e instrumentos de gestión, que permitan implementar estrategias de minimización y control de la contaminación atmosférica. Estos programas de vigilancia consisten desde la determinación de las condiciones existentes hasta la observación de las regulaciones vigentes de control, la evaluación de su eficiencia y el establecimiento de nuevas medidas de gestión ambiental.

Un indicador útil de niveles de contaminación ambiental que aporta datos valiosos acerca de entradas de nutrientes y compuestos tóxicos a los sistemas terrestres y acuáticos; es la lluvia. (Parungo, 1990). Este mecanismo natural de limpieza de la atmósfera, tiene propiedades de acarreo únicas; remueve los gases atmosféricos, aerosoles, partículas, y todos aquellos compuestos que han sido introducidos a la atmósfera por diferentes fuentes de emisión natural (erupciones volcánicas, incendios forestales y descargas eléctricas) y/o antropogénicas (plantas de generación de energía, industria y transporte).

La presencia de precipitación ácida, (término usualmente conocido como lluvia ácida o depósito ácido atmosférico), se ha acentuado en áreas específicas de la ciudad, y es actualmente, uno de los principales problemas ambientales asociado a la contaminación atmosférica.

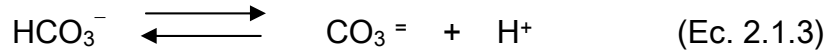
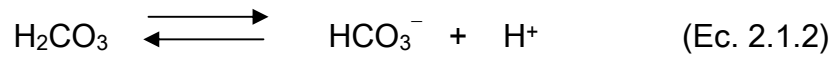
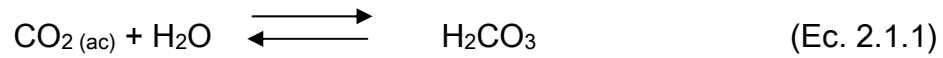
## 2.1 DEPÓSITO HÚMEDO ÁCIDO (LLUVIA ÁCIDA)

El depósito atmosférico, es la cantidad de cualquier contaminante suspendido en la atmósfera que se deposita en la superficie de la tierra (expresado en unidad de área); si desciende por acción del viento o de la fuerza de gravedad, se denomina depósito seco y si desciende por acción de algún tipo de precipitación meteorológica se denomina depósito húmedo o lluvia ácida.

La lluvia ácida (lluvia, nieve o niebla), se forma al reaccionar la humedad de la atmósfera con el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) u otros contaminantes, influenciados por la temperatura y la radiación solar.

El *Programa Nacional de Depósito Atmosférico* (NADP) de la *Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos* (US-EPA), define el término de lluvia ácida, como aquella precipitación que presenta un  $\text{pH} < 5.6$ , esta definición considera que el agua presente en la atmósfera en forma de pequeñas gotas, ya tiene cierta acidez. A diferencia de lo que comúnmente se define como disolución ácida (aquella que posee un valor de  $\text{pH} < 7.0$ ),

La saturación del agua presente en la atmósfera con determinados gases que se encuentran de forma natural, tales como el bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el nitrógeno ( $\text{N}_2$ ), el oxígeno ( $\text{O}_2$ ), etc., conlleva a la formación de otros compuestos que le imparten características ácidas, como es el caso del bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Este gas al reaccionar con el agua da lugar a la formación de ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), (Ec. 2.1.1). Si conociéramos la concentración de  $\text{CO}_2$  presente en la atmósfera, podríamos estimar el valor de  $\text{pH}$  del agua de lluvia, considerando la constante de saturación del  $\text{CO}_2$  en el agua y los siguientes equilibrios químicos.



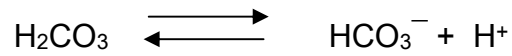
En el equilibrio:

$$K_{a1} = \frac{[\text{HCO}_3^-][\text{H}^+]}{[\text{CO}_2(\text{ac})]} = 4.47 \times 10^{-7} \quad (\text{Ec. 2.1.4})$$

$$K_{a2} = \frac{[\text{CO}_3^{2-}][\text{H}^+]}{[\text{HCO}_3^-]} = 4.68 \times 10^{-11} \quad (\text{Ec. 2.1.5})$$

Los valores de  $K_{a1}$  y  $K_{a2}$  están dados a temperatura de 25 °C

De los equilibrios anteriores se puede deducir que la especie predominante es el  $\text{HCO}_3^-$ , debido a que la segunda constante de ionización es muy pequeña en comparación con la primera, por lo que se considera:



Inicio	Co	-	-
En el Equilibrio	Co - $\alpha$	$\alpha$	$\alpha$

$$K_{a1} = \frac{[\alpha]^2}{[\text{Co} - \alpha]} = 4.47 \times 10^{-7} \quad (\text{Ec. 2.1.4})'$$

Siendo “ $\alpha$ ” la concentración del Ion hidronio  $[H^+]$  y  $[Co -\alpha]$  la concentración del ácido carbónico formado.

$$[\alpha]^2 = 4.47 \times 10^{-7} [Co -\alpha] \quad (\text{Ec. 2.1.6})$$

$$4.47 \times 10^{-7} Co - 4.47 \times 10^{-7} \alpha - \alpha^2 = 0 \quad (\text{Ec. 2.1.7})$$

La concentración del  $H_2CO_3$ , se obtiene en función de la concentración de  $CO_2$ , el cual se puede estimar mediante la Ley de Henry; Esta ley indica que la solubilidad de un gas es directamente proporcional a la Presión parcial ( $P_p$ ) del gas en cuestión:

$$[CO_2]_{\text{disuelto}} = K_H p \quad (\text{Ec. 2.1.7})$$

Donde:

$$K_H (25^\circ C) = 33.363 \times 10^{-3} \text{ mol / L}\cdot\text{atm}$$

$$P_p CO_2 = 3.6 \times 10^{-4} \text{ atm}$$

Suponiendo que la concentración de  $CO_2$  en la atmosfera es de  $1.2 \times 10^{-5}$ . El valor de pH  $\approx 5.63$  resulta al resolver las ecuaciones 2.1.6 y 2.1.7 en términos de concentración y de las constantes de equilibrio de las reacciones involucradas (Masters, 1998) (Doménech, 2006).

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 hidronio  $[H^+]$  incrementa. En muchos casos como consecuencia de reacciones de formación de otros ácidos diferentes a  $H_2CO_3$ . En estas condiciones se habla de una lluvia con características ácidas de origen antropogénico (Bravo et al, 2005).

Sí los valores del pH de la lluvia son superiores a 5.6, se puede considerar la incorporación de depósito seco y la disolución de partículas con características alcalinas, tales como carbonatos.

## 2.2 PRECURSORES DE LA PRECIPITACIÓN ÁCIDA

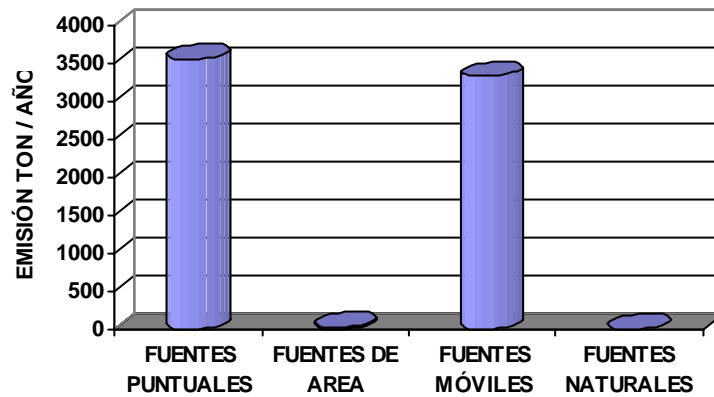
De los precursores del depósito húmedo ácido, los principales compuestos presentes en la atmósfera son el amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) y el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ).

### 2.2.1. DIÓXIDO DE AZUFRE

El dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) se produce durante la quema de combustibles fósiles que contienen azufre. También están presentes otros compuestos que participan en la oxidación del azufre, procedentes de procesos naturales: disulfuro de carbono ( $\text{CS}_2$ ), dimetilsulfuro ( $\text{CH}_3\text{SCH}_3$ ), óxido de dimetilsulfuro ( $\text{CH}_3\text{SOCH}_3$ ) y ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) (Taylor y Lloyd, 1992).

De acuerdo a los inventarios de emisiones, de la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal (SMA-2006), para las emisiones de  $\text{SO}_2$ , en el Distrito Federal, las fuentes puntuales y las fuentes móviles son las que contribuyen en mayor proporción a la generación de este contaminante.

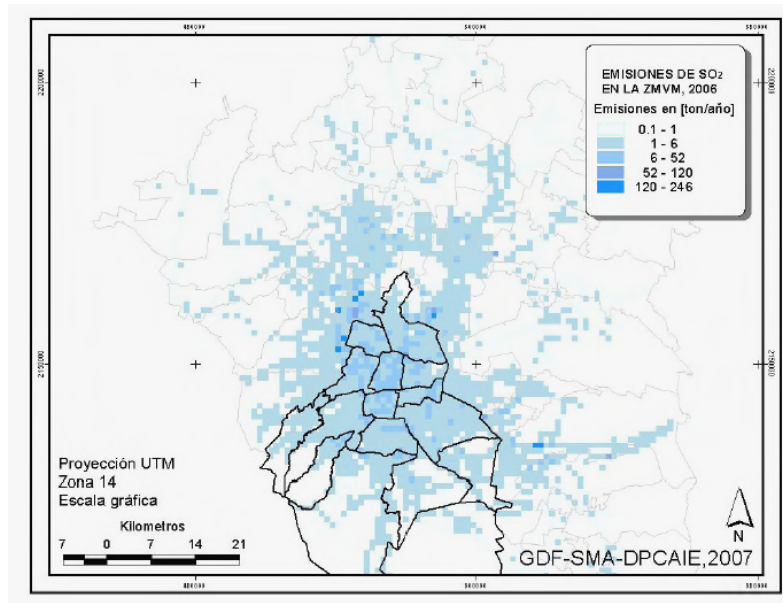
De acuerdo al inventario en el año 2006, la industria emitió 3,555 ton/año que correspondió al 55% de las emisiones totales, mientras que las fuentes móviles contribuyeron con 3,324 ton/año que correspondieron al 48.1% de las 6,913 toneladas totales de  $\text{SO}_2$  que se generaron en la ZMCM. Por rubros, las ramas más contaminantes fueron las industrias química, textil y del papel, que aportan en conjunto el 18% del  $\text{SO}_2$  emitido en la ZMCM. Estos giros consumen cantidades importantes de combustible industrial líquido, con contenidos de azufre que oscilan entre 0.04% y 3.8% (SMA, 2006), (Figura 2.1).



**Figura 2.1 Principales fuentes de emisión de SO<sub>2</sub> en la ZMCM**

Fuente: Inventario de emisiones, Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal (2006)

Con respecto a las fuentes móviles en la categoría de autos particulares, estos contribuyeron con el 21% (1,463 ton/año) del SO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera y que proviene de la gasolina que consumen. Ya que la zona urbana es la que presenta mayor afluencia vehicular, principalmente en las delegaciones de Benito Juárez, Cuauhtémoc y en menor proporción en la periferia.



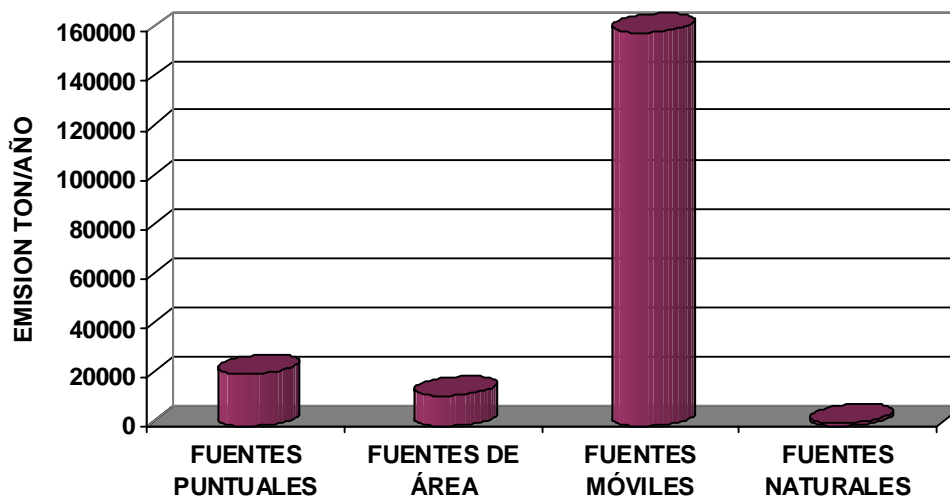
**Figura 2.2 “Distribución espacial del SO<sub>2</sub> en la ZMCM”**

Fuente: Inventario de emisiones, Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal (2006)

## 2.2.2 ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO<sub>x</sub>)

Los principales compuestos de nitrógeno presentes en la atmósfera son las formas oxidadas NO, NO<sub>2</sub> y HNO<sub>3</sub>, que se relacionan químicamente entre sí, por una serie de reacciones cíclicas. La fuente principal de óxido de nitrógeno atmosférico, es la reacción entre el nitrógeno y el oxígeno del aire empleado en procesos de combustión a temperaturas elevadas. Comúnmente la connotación NO<sub>x</sub> agrupa al óxido de nitrógeno (NO) y al dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>).

Los óxidos de nitrógeno, al igual que el CO, se generan principalmente de fuentes móviles. Contribuyen con el 82% de las 179,996 toneladas anuales que se emiten de este contaminante, siendo los automóviles particulares los que más aportan con el 32% (57,456 ton/año), le siguen en orden de importancia los tractocamiones con el 16%. Con una menor emisión se tiene a los taxis y a los vehículos menores a 3 toneladas, así como la generación de energía que contribuyen con el 6% cada uno (Figura 2.3).



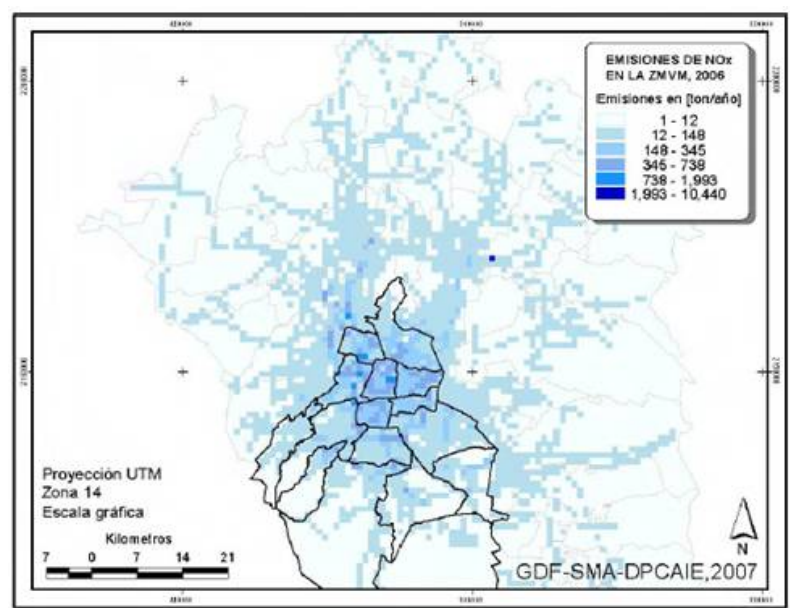
**Figura 2.3 Principales fuentes de emisión de NO<sub>x</sub> en la ZMCM**

Fuente: Inventarios de emisiones, Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal (2006).



La distribución espacial de los NO<sub>x</sub>, varía conforme a la actividad del parque vehicular, concentrándose en la zona urbana donde el tránsito es intenso y sigue un patrón de distribución conforme a la red vial de la Ciudad de México.

Aunque la región de mayor emisión de NO<sub>x</sub> se localiza en la parte central de la ZMCM, destacan las emisiones resultantes de la generación de energía eléctrica en el Noroeste, donde se consumen grandes cantidades de gas natural (Figura 2.4).



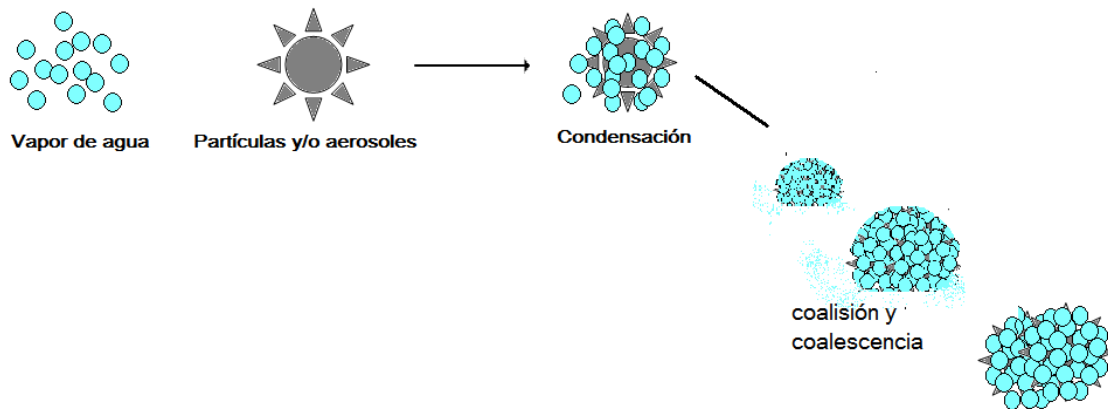
**Figura 2.4 Distribución espacial de NO<sub>x</sub> en la ZMCM**

Fuente: Inventarios de emisiones, Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal (2006).

### 2.3 PROCESOS DE FORMACIÓN DE LLUVIA ÁCIDA

El aire contiene gran variedad de partículas sólidas, líquidas y gases en suspensión que son emitidas de forma natural o durante actividades antropogénicas. Estos aerosoles son transportados o acumulados en la atmósfera y sirven como Núcleos de Condensación de Nubes (NCN), los cuales se condensan en partículas de mayor

tamaño, para posteriormente sufrir coalescencia en cadenas de agregados, siendo finalmente eliminados por la precipitación pluvial (Figura 2.5).



*Figura 2.5. Formación de gotas de lluvia*

Para comprender el proceso de formación de la lluvia ácida, es necesario conocer las reacciones de formación y transformación de los principales precursores, reacciones que se describen a continuación.

### 2.3.1 FORMACIÓN DEL ÁCIDO SULFÚRICO ( $H_2SO_4$ ) Y DEL ÁCIDO NÍTRICO ( $HNO_3$ )

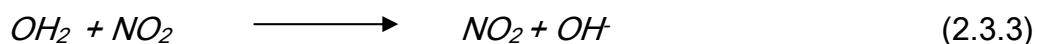
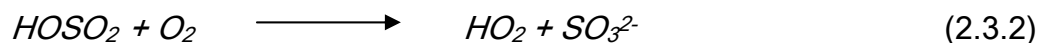
Existen diversas y muy importantes reacciones que se llevan a cabo en la troposfera y estratosfera en las cuales participan especies moleculares que contienen nitrógeno y azufre, sin embargo las de interés para este estudio son aquellas que involucran las rutas de síntesis o de desintegración de especies derivadas de iones nitrato y/o sulfato y por ende de los ácidos nítrico y sulfúrico.

Los estudios de identificación y caracterización de la composición química de la lluvia ácida se efectúan en periodos de tiempo prolongados y generalmente relacionan la formación de lluvia ácida con las emisiones totales de  $SO_2$  y  $NO_x$ , y la

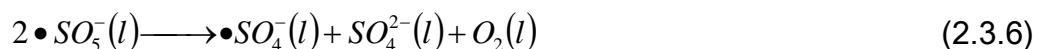
concentración de los iones sulfato y nitrato ( $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$ ) determinados en el análisis del depósito húmedo o seco (Báez, 1997).

El proceso de formación de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , inicia con la oxidación del dióxido de azufre gaseoso ( $\text{SO}_2(g)$ ) con el radical hidroxilo ( $\bullet\text{OH}$ ) en fase líquida; las gotas de agua de lluvia o niebla que contienen al  $\text{SO}_2$  disuelto, se mezclan (reacción 2.3.1 y 2.3.2) en presencia de agentes oxidantes tales como peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) y ozono ( $\text{O}_3$ ); o por reacciones de oxidación en las superficies de los aerosoles sólidos. Estas reacciones de oxidación atmosférica son las más importantes para el  $\text{SO}_2$  (Baulch et al., 1982; Grosjean, 1984; Finlayson-Pitts, 1986; Schwartz, 1989).

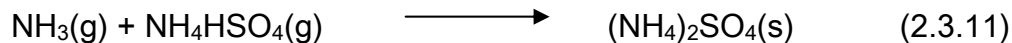
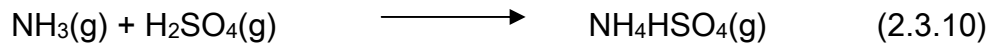
Reacciones en fase gaseosa:



Reacciones en fase líquida:



El  $\text{H}_2\text{SO}_4$  formado tiene una presión de vapor baja y se condensa fácilmente en presencia de  $\text{H}_2\text{O}$ . De la misma manera que el  $\text{HNO}_3$ , el  $\text{H}_2\text{SO}_4$  puede dar lugar a un proceso de transformación de gas a partícula sólida por reacción, principalmente con el amoníaco presente en la atmósfera:



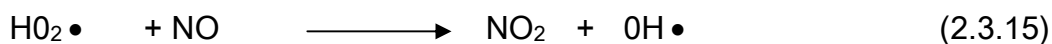
Se sabe que el  $\text{SO}_4^{2-}$  contribuye en mayor proporción a la acidez en comparación con  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NO}_2$  lo cual está de acuerdo con los patrones regionales de formación de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y  $\text{HNO}_3$ , con la velocidad relativa de su oxidación en la atmósfera a productos secundarios y con la eficiencia de remoción atmosférica de compuestos de nitrógeno y azufre por precipitación (Galloway et al., 1982).

Estudios sobre los  $\text{NO}_x$  emitidos en áreas urbanas, indican que más del 95% está formado por  $\text{NO}$ . Dada su predominancia el  $\text{NO}$  emitido se oxida a  $\text{NO}_2$ , el cual puede reaccionar con  $\text{OH}^-$  durante el día así como también con  $\bullet\text{HO}_2$ ,  $\bullet\text{R}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\bullet\text{RO}$ ,  $\bullet\text{RO}_2$ ,  $\text{HNO}_3$  entre otros.

Reacciones en fase acuosa:

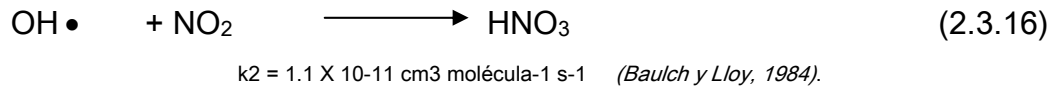


En las reacciones (2.3.12, 2.3.13 y 2.3.14) que ocurren en fase acuosa, el  $\text{NO}$  y  $\text{NO}_2$  contribuyen al depósito del ácido nítrico en forma de gotas, el tiempo de vida del  $\text{NO}_2$  es de aproximadamente 1 día (Finlayson-Pitts, 1986). Bajo estas condiciones el radical hidroperoxi reacciona con  $\text{NO}$  para formar  $\text{NO}_2$  y el radical  $\bullet\text{OH}$ , el cual es una de las principales especies involucradas en la química atmosférica.



$$k_1 = 3.7 \times 10^{-12} \exp(240/T) \text{ cm}^3 \text{ molécula}^{-1} \text{ s}^{-1} \quad (\text{Baulch, 1982})$$

Finalmente, con  $\bullet\text{OH}$  y  $\text{NO}_2$  como reactantes principales se forma ácido nítrico:



Las especies prominentes en la química atmosférica, son el  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  y  $\text{HNO}_3$ . La Figura 2.6 muestra un esquema expandido de la química atmosférica de los óxidos de nitrógeno.

En la parte superior de la Figura 2.6 se indican cuatro de los compuestos orgánicos nitrogenados que se pueden formar en presencia de radicales libres orgánicos.

El  $\text{NO}_3$  puede ser formado por la reacción del  $\text{NO}_2$  con  $\bullet\text{O}$  u  $\text{O}_3$ , la última es la ruta de mayor importancia. El  $\text{NO}_3$  puede reaccionar con  $\text{NO}$  o ser fotolizado para regenerar  $\text{NO}_2$  o reaccionar con una molécula adicional de  $\text{NO}_2$  para generar  $\text{N}_2\text{O}_5$ . Asimismo, el  $\text{N}_2\text{O}_5$  puede descomponerse térmicamente.

Se cree que alguna fracción reacciona heterogéneamente con  $\text{H}_2\text{O}$ , formando ácido nítrico. Durante el día, el proceso de pérdida dominante para  $\text{NO}_3$ , es la fotólisis. Bajo condiciones nocturnas, la ruta  $\text{NO}_2$  a  $\text{NO}_3$  a  $\text{N}_2\text{O}_5$  y a  $\text{HNO}_3$  es la predicha para ser dominante (Rusell et al., 1985; Stockwel y Calvert, 1983).

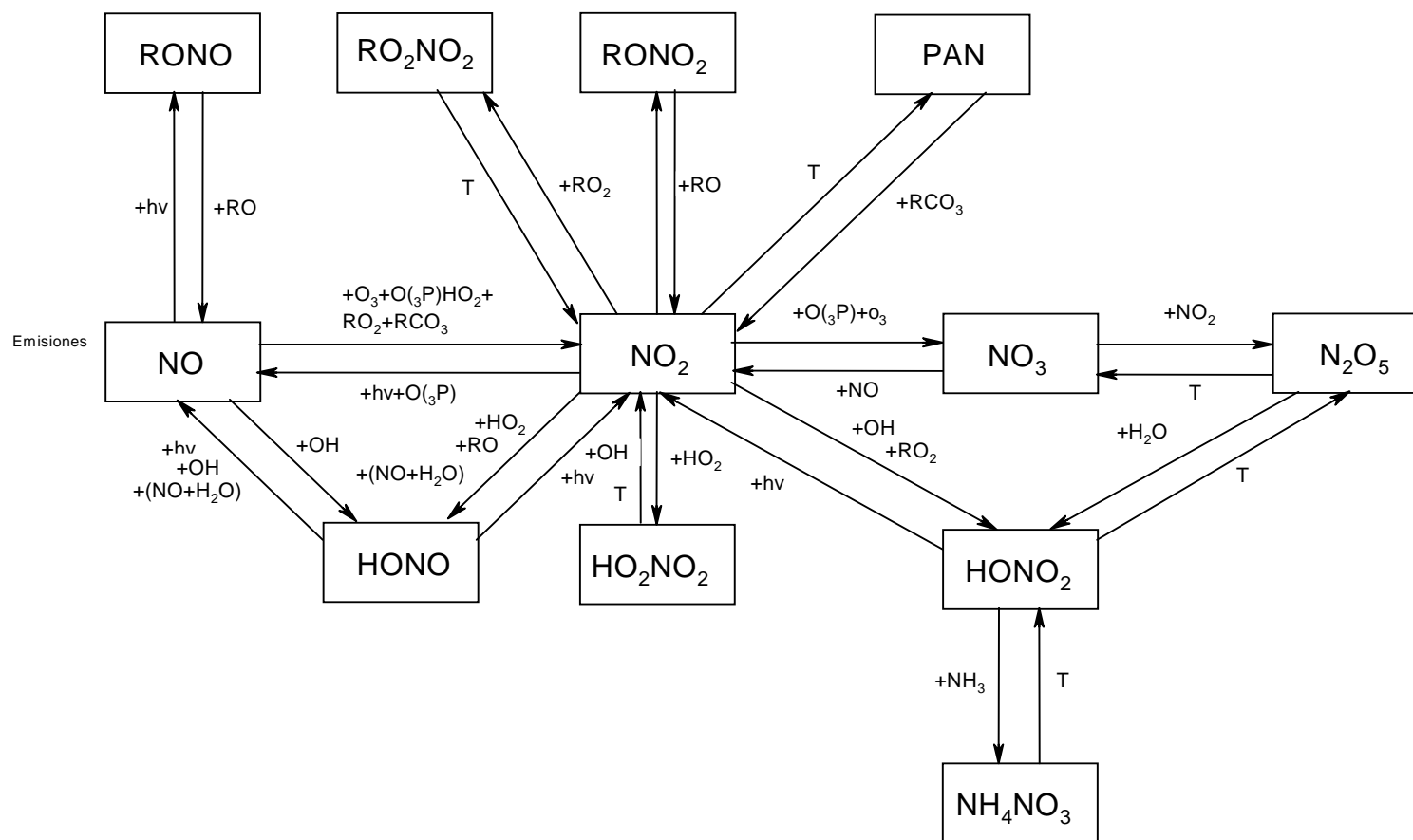


Figura 2.6. Química atmosférica del nitrógeno (Mcrae Y Rusell, 1984)

La lluvia ácida es influenciada en menor proporción por ácidos débiles como el ácido acético y fórmico, mientras que los fuertes (ácido sulfúrico y nítrico) debido a su fuerza iónica son los que determinan la acidez en el agua de lluvia cuando no son neutralizados. Sin embargo, si la presencia de los ácidos débiles es considerable, éstos causarían la acidificación (Finlayson-Pitts, 1986).

### 2.3.2 PROCESOS DE REMOCIÓN ATMOSFÉRICA Y TIEMPOS DE RESIDENCIA

Una vez formados los precursores de la lluvia ácida, son finalmente removidos de la atmósfera, por uno de los siguientes mecanismos:

1. **Deposición húmeda.** Transferencia de los contaminantes mediante su absorción en gotas de agua, seguida de su remoción por precipitación.
2. **Deposición seca.** Transferencia de contaminantes a la superficie de la tierra, agua o vegetación., cuando no llueve, este término también incluye la absorción de partículas y gases del agua en el suelo y la superficie

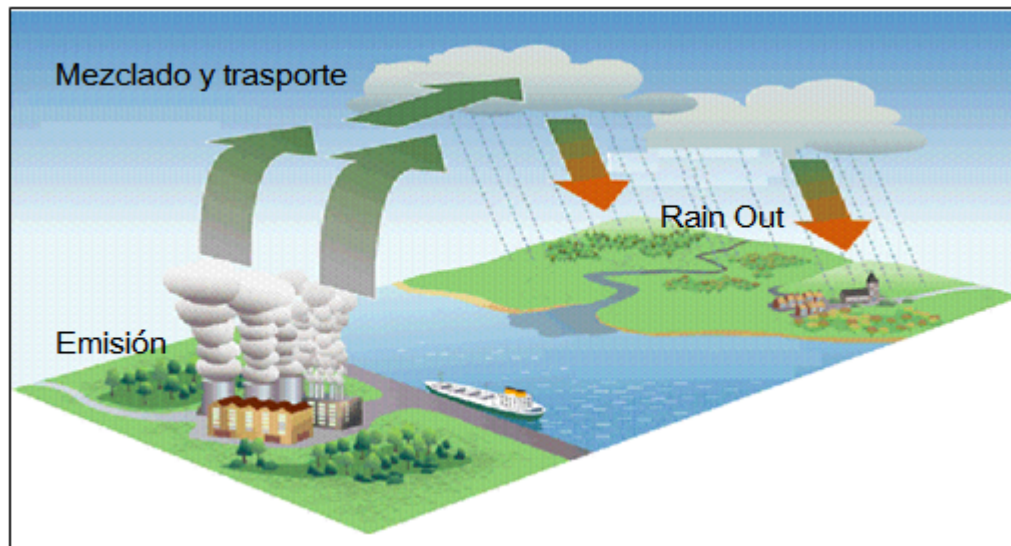
Un número de términos diferentes son usados como sinónimos de depósito húmedo, incluyendo precipitación de arrastre, remoción húmeda, “washout” y “rainout”. Estos términos se refieren a la remoción de materia de la atmósfera por varias formas de precipitación tales como, lluvia, nieve, etc.

#### 2.3.2.1 ARRASTRE “RAIN OUT”

Este proceso se da al interior de las nubes, las cuales son alimentadas por las corrientes convectivas ascendentes que se saturan de vapor de agua y condensan. Dentro de las corrientes ascendentes también se forman compuestos ácidos que

actúan como núcleos de condensación durante la formación de las nubes. (Hutchinson, T.C., 1978; Slinn, W.G.N., 1980; Carrasco, O. Carlos, 1996).

Bajo este proceso, los precursores pueden viajar varios kilómetros desde su lugar de formación y a través de mecanismos de coalescencia e impactación, pueden precipitar después como depósito húmedo (lluvia, granizo, niebla, etc.) lejos de donde fueron emitidos (Legge, et al, 1990) (Figura 2.7)



**Figura 2.7 Formación de lluvia ácida por "Rain Out".**

Modificada de <http://readeratwork.blogspot.com/2009/01/acid-rain.html>

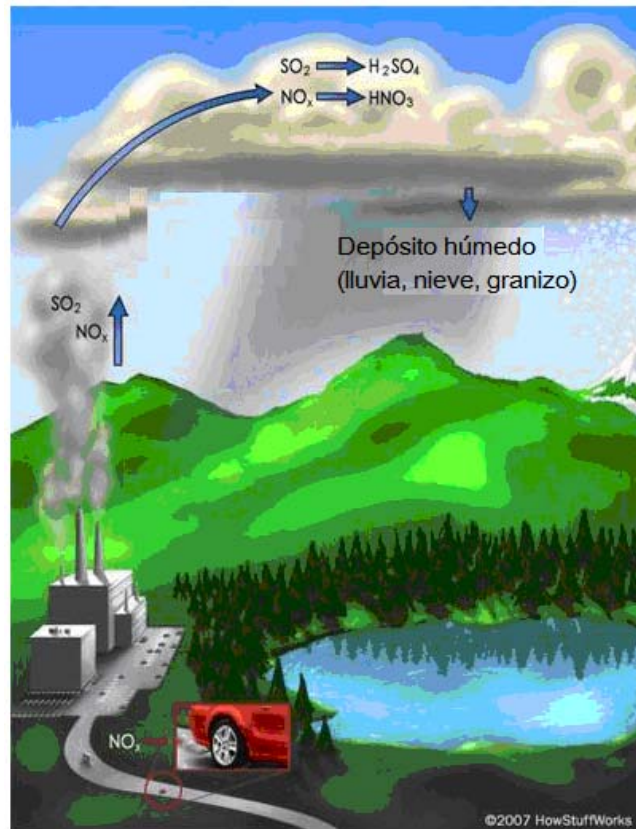
### 2.3.2.2 LAVADO "WASH OUT"

Es el mecanismo mediante el cual los compuestos ácidos se incorporan por absorción a las gotas de lluvia, durante su caída desde las nubes hasta el suelo. (Hutchinson, T.C., 1978; Carrasco, O. Carlos, 1996).

Cuando el aire de la atmósfera alcanza una humedad del 100%, se genera un proceso de condensación, se forman gotas y precipitan. Si por debajo de las nubes hay presencia de SO<sub>x</sub> y NO<sub>x</sub>, que se mezclan con las gotas recién formadas, por lo



que la lluvia lava la atmósfera que contenía a los precursores (Martín, a., 1984) (Figura 2.8).



**Figura 2.8 Formación de lluvia ácida por "Wash Out".**

Modificada de <http://www.trusteddetailing.com/acid-rain-repair.php>

## 2.4 EFECTOS DE LA LLUVIA ÁCIDA

No se ha demostrado aún que la lluvia ácida ocasione efectos nocivos directos en los seres humanos; para que esto suceda tendrían que presentarse valores de pH en el agua de lluvia muchísimo más bajos de los que actualmente se registran. Los riesgos potenciales en la salud se identifican por la presencia de los contaminantes precursores de la lluvia ácida, es decir, los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) y los óxidos de azufre ( $\text{SO}_x$ ), dichos compuestos pueden provocar y agravar enfermedades respiratorias y del corazón; sus derivados en materia particulada como los sulfatos y

los nitratos, contribuyen a la degradación de la visibilidad y generan mayores impactos en la salud pública por ser material particulado muy fino (O.A.Q.P.S., 1998; E.P.A., 1999).

Los efectos que la lluvia ácida ocasiona, se detectan en los sistemas acuáticos, tales como arroyos, lagos y pantanales. La precipitación en los bosques, campos, edificios y caminos, pasa a formar parte del volumen de lluvia que fluye hacia éstos sistemas. La mayoría de lagos y arroyos tienen un pH entre 6 y 8; aunque algunos son naturalmente ácidos aún sin los efectos de la lluvia ácida.

La lluvia ácida afecta primordialmente a los cuerpos de agua sensibles, situados en cuencas cuyos suelos tienen una capacidad limitada para neutralizar compuestos ácidos ([www.epa.gov](http://www.epa.gov)).

En áreas con poca capacidad de amortiguamiento a los cambios de pH, la lluvia ácida disuelve el aluminio de los suelos, el cual puede ser transportado a los lagos y arroyos cercanos. El Aluminio es sumamente tóxico para muchas especies de organismos acuáticos. En un estudio Nacional de los cuerpos de Agua Superficiales (*National Surface Waters Survey, NSWS*) se determinó la presencia de lluvia ácida en el 75 % de los lagos y en el 50 % de los arroyos, en regiones como las del noroeste de los Estados Unidos en donde se registran valores de pH menores de 5.

Dada la interdependencia que existe entre los múltiples peces, plantas y otros organismos que viven en un ecosistema acuático, los cambios en los niveles de pH pueden afectar a la biodiversidad. Consecuentemente, a medida que los lagos y arroyos se tornan más ácidos, van disminuyéndose los números y clases de peces y otros animales y plantas acuáticas que viven en esos sistemas acuáticos.

En los ecosistemas terrestres, los daños provocados por la lluvia ácida afectan principalmente a los árboles y las plantas, sin embargo, usualmente la lluvia ácida no acaba con la vegetación, sino que actúa de manera gradual, haciendo más lento su crecimiento y favoreciendo el ataque de plagas y enfermedades. Se sabe que la lluvia ácida disuelve los nutrientes y minerales del suelo (calcio, magnesio, potasio)

y luego los arrastra consigo antes de que los árboles y otras plantas puedan usarlos para su desarrollo, al mismo tiempo en situaciones extremas, la lluvia ácida incrementa la acidez de los suelos, lo cual provoca cambios en su composición debido a la lixiviación de nutrientes y al arrastre de metales tóxicos como el cadmio, níquel, manganeso, plomo, mercurio y aluminio, lo cual daña a la vegetación y a los organismos que de ella se alimentan.

La lluvia ácida también afecta de forma directa al patrimonio cultural, ya que daña edificios, monumentos históricos, estatuas y otras estructuras de importancia cultural cuya pérdida sería invaluable. El daño se presenta en los materiales que recubren o forman dichas estructuras, las cuales están compuestas principalmente de piedra caliza (carbonato de calcio), material muy susceptible a la degradación por ácidos (Bravo, 2009). Así mismo, contribuye al deterioro de las pinturas, de los revestimientos de los automóviles y la corrosión de los metales como el bronce.

La deposición seca por su parte ensucia los edificios y otras estructuras, lo cual se traduce en mayores costos de mantenimiento.

## **2.5 CRONOLOGÍA DE ESTUDIOS SOBRE LLUVIA ÁCIDA EN LA ZMCM**

Los estudios sobre deposición ácida en México inician en los años sesentas, cuando se realizaron las primeras investigaciones en Puerto Vallarta, Jalisco (Bravo, 1964).

Las primeras investigaciones sobre presencia, caracterización y efectos de las precipitaciones ácidas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), fueron iniciadas en la década de 1980 por el Dr. Humberto Bravo Álvarez con el apoyo del Capitán Silvino Aguilar Anguiano, Director del Servicio Meteorológico Nacional, cubriendo 12 sitios de muestreo (Aeropuerto, Chapingo, Cincel, Cuajimalpa, Cuauhtepac, Iztapalapa, Molinito, San Gregorio, San Juan Ixhuatepec, Tacuba, Tacubaya y Tizayuca). De los cuales, los valores de pH determinados (entre 6.2 y 6.8) fueron poco representativos de la situación real de esta zona de

estudio; debido a que inicialmente las estaciones de monitoreo estaban equipadas con colectores convencionales de depósito total (Figura 2.9) tanto para la colección de lluvia como de la deposición seca conjuntamente.

Estos estudios indicaron la necesidad de modificar el sistema de colección de las muestras de precipitación. Posteriormente, en 1984, se instaló el primer colector automático de precipitación ácida, en la Universidad Nacional Autónoma de México, el cual ya permitía la separación tanto de la lluvia como de la deposición seca (Figura 2.10).

En 1987 se inició el monitoreo sistematizado de lluvia ácida mediante el *Programa de Precipitaciones Ácidas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (PPAZMCM)*, que conducía la *Secretaría de Ecología de la SEDUE*, ahora el *Instituto Nacional de Ecología (INE)*. En 1993 fue transferido junto con la *Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA)*, a la *Dirección General de Ecología del Departamento del Distrito Federal*, hoy *Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire de la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal*.

En el año 2001 se consolidó la *Red de Depósito Atmosférico (REDDA)* y se integró al *Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT)*.



*Figura 2.9. Colector convencional de iarra abierta*



*Figura 2.10. Colector automático de depósito "Wet & Dry"*

Actualmente, en varias regiones del país, se encuentran localizados varios de estos colectores, ya que el interés por estudios de este contaminante secundario se ha incrementado.

### **2.5.1 CRONOLOGÍA DE ESTUDIOS SOBRE LLUVIA ÁCIDA A CARGO DE LA SCA/CCA/UNAM**

Como ya se mencionó la *Sección de Contaminación Ambiental del Centro de Ciencias de la atmósfera (SCA- CCA)* a cargo del Dr. Humberto Bravo Álvarez, mantiene un constante muestreo y análisis de la deposición atmosférica, no solo en la ZMCM; también participan en estudios sobre química atmosférica y lluvia ácida en la costa del Golfo de México, realizado por investigadores mexicanos, adscritos al SCA-CCA UNAM. Estos estudios datan de 1986 (Bravo et al., 1988a y b; Parungo et al., 1988, 1990; Quintana et al., 1988), cuando se llevó a cabo una investigación oceanográfica en el Golfo de México, durante los meses de julio y agosto.

En este estudio participaron instituciones como el *Laboratorio Oceanográfico y la Secretaría de Marina en Veracruz (SM)* y la *National Oceanic and Atmospheric Administration de los Estados Unidos de América (US-NOAA)*. Las actividades consistieron en la identificación, el transporte, la transformación y la ocurrencia de contaminantes atmosféricos, así como en la determinación del pH de la precipitación en las regiones costeras del Golfo de México.

Esta colaboración bilateral entre científicos de los Estados Unidos de Norteamérica (USA) y México, originó resultados importantes para un mejor conocimiento de la interacción océano-atmósfera en el Golfo de México. En la misma década de los 80's se llevaron a cabo estudios de precipitación en Tulum, Quintana Roo y Palenque Chiapas.

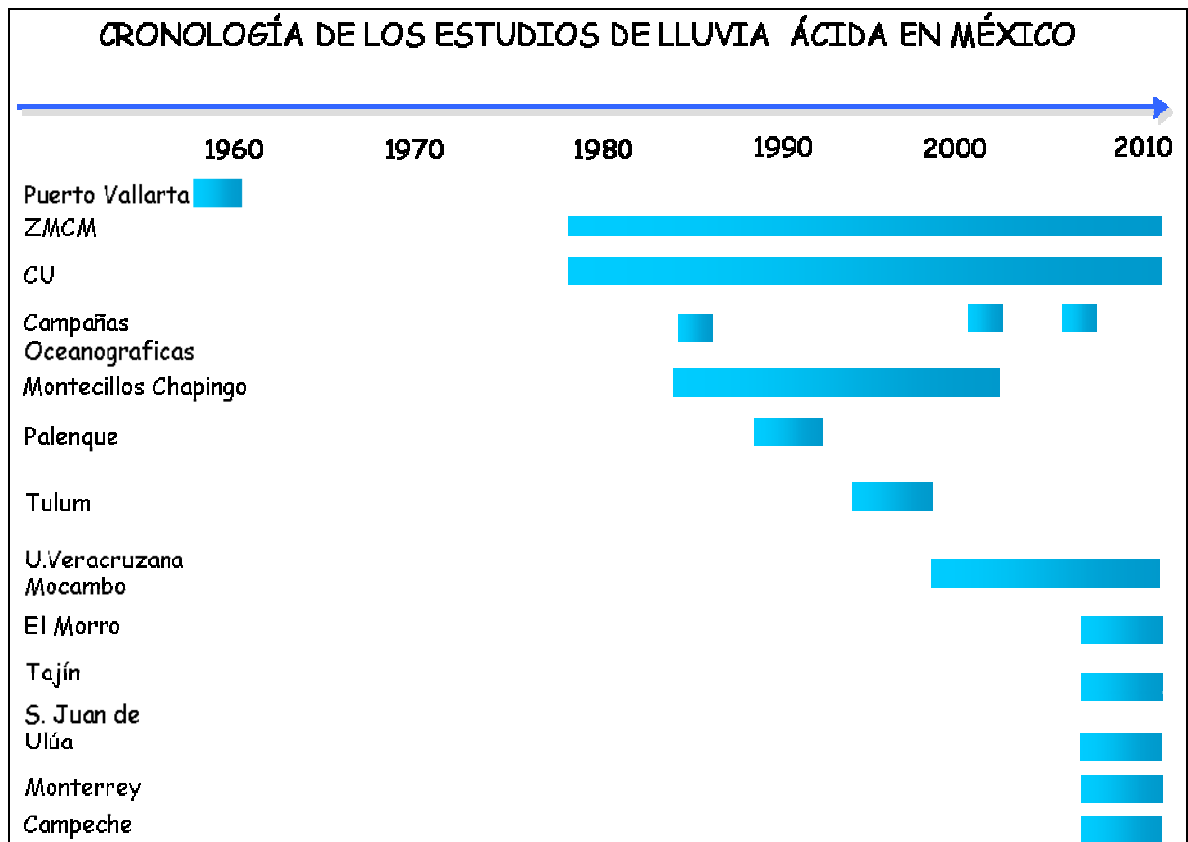
En 2002 se retomaron los estudios sobre calidad del aire en el Golfo de México en colaboración con el Instituto de ciencias del Mar y Limnología de la UNAM. Del 2002

a la fecha se realizaron 4 cruceros de investigación, uno en el oriente y tres en el sur del Golfo de México.

A partir de 2003 se trabaja en colaboración con el Sistema de Monitoreo Atmosférico del Gobierno del Distrito Federal, en la determinación de la deposición húmeda en 16 estaciones de monitoreo en la ZMCM. Personal del GDF tiene a su cargo el muestreo, mientras que la Sección de contaminación Ambiental tiene a su cargo el análisis de las muestras en el laboratorio.

Actualmente se llevan a cabo estudios sobre deposición ácida en la zona Arqueológica de El Tajín, Veracruz, con apoyo del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH); en el Instituto de Ecología, A.C., El Morro de la Mancha Veracruz, en la Fortaleza de San Juan de Ulúa en el Puerto de Veracruz y en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM). Recientemente se instaló un colector en la Cd. de Campeche en colaboración con la Universidad Autónoma de Campeche, y en Nuevo León en la Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey.

Como consecuencia de la investigación que se viene realizando, en 2009, el laboratorio de la Sección de Contaminación Ambiental forma parte del programa de Estudios intercomparativos entre laboratorios a nivel mundial, bajo el programa *"Global Atmosphere Watch Precipitation Chemistry Program"*. En la Figura 2.11 se muestra la cronología de los estudios de lluvia ácida en la SCA en el CCA de la UNAM a cargo del Dr. Humberto Bravo Álvarez.



*Figura 2.11 Cronología de los estudios sobre lluvia ácida en México*

## 2.6 MODELOS DE TRAYECTORIA DE RETROCESO

Los modelos de trayectoria de retroceso (“Back trajectory”) son herramientas que nos permiten estimar el transporte de los contaminantes y los cambios de concentración ambiental, relacionando las regiones donde se localizan las fuentes de emisión y las zonas receptoras de interés (NAPAP ,1990).

Existen diversos modelos desarrollados por la *National Oceanic Atmospheric Administration (NOAA)* y por el *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)*, de los cuales destacan tres tipos que se usan de forma global o regional para una zona en particular.

### 2.6.1 MODELOS ESTADÍSTICOS

Los modelos estadísticos además de establecer relaciones entre las fuentes de emisión y los sitios de deposición, proporcionan valores preliminares acerca de los efectos que ciertos cambios de los valores de emisión pueden producir en los sitios de deposición y no requieren de sofisticados equipos de cómputo para su desempeño. Ejemplos de éstos son: El Modelo STATMOD y el modelo MODEL T, ambos se utilizan para conocer la dispersión y la concentración de SO<sub>2</sub> que se tienen en una zona a partir de la emisión puntual (Clark, et al., 1987).

### 2.6.2 MODELOS LAGRANGIANOS

Los modelos Lagrangianos estudian el transporte de una parcela de aire desde su origen hasta el lugar donde se deposita, estos modelos toman en cuenta las emisiones, el depósito atmosférico seco y húmedo, así como las transformaciones químicas. Estas últimas características son representadas mediante una razón de cambio de primer orden, es decir, las ecuaciones utilizadas para el desarrollo de este tipo de modelos son lineales, lo cual se considera un punto débil del modelo, si se toma en cuenta que el transporte en la atmosfera, no se da de manera lineal (NAPAP, 1990). Ejemplo de éstos son: El Modelo HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model) y el FLUX PARTICULE (FLEXPART) (Stohl, et al., 2005), los cuales calculan trayectorias simples y simulan su deposición.

Los cálculos de trayectoria con el modelo HYSPLIT muestran la dirección general, pero no es lo suficientemente preciso para identificar fuentes específicas puntuales, la razón de dispersión se calcula a partir del perfil de difusión vertical, la cizalladura y la deformación horizontal del campo de viento. El modelo usa una base de datos ya registrada, los cuales se pueden obtener de la NOAA; posee una resolución de 1° x 1°, con una resolución de 40Km x 40 Km.



El Modelo FLEXPART se deriva de un modelo meteorológico usado por el Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) y se diferencia de otros modelos por considerar la dispersión por turbulencia, éste modelo se desarrolla en base LINUX y está programado en FORTRAN 77.

### **2.7.3 MODELOS EULERIANOS**

Los modelos eulerianos incluyen las variaciones en el tiempo de las variables meteorológicas, las cuales pueden representarse en forma de mapas sucesivos, donde cada uno de ellos corresponde a distintos tiempos de la distribución de la variable de interés.

La concentración de ciertas especies de contaminantes se define como función del espacio y del tiempo, relacionando estos parámetros con ecuaciones diferenciales. Estos modelos toman en cuenta el transporte horizontal y vertical del viento, así como las reacciones químicas de los diferentes compuestos que se encuentran en la atmósfera. La complejidad de estos modelos requiere de un mayor tiempo de análisis y de un equipo de cómputo adecuado.

**CAPÍTULO 3**

**ZONA DE ESTUDIO**

## CAPÍTULO 3

### ZONA DE ESTUDIO

#### 3.1 ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO (ZMCM)

##### 3.1.1 FACTORES GEOGRÁFICOS

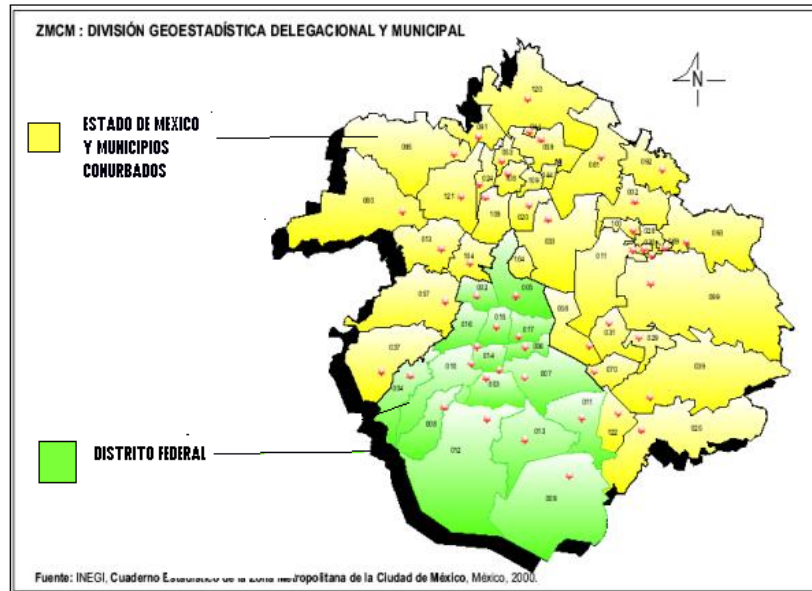
La ZMCM está situada a 2 240 metros sobre el nivel del mar (msnm), queda comprendida por el territorio integrado por las 16 Delegaciones del Distrito Federal y 59 municipios del Estado de México<sup>1</sup> con una superficie de 9 560 km<sup>2</sup>, (Figura 3.1).

La ZMCM está rodeada por una cadena montañosa formada por las sierras Chichinautzin, Nevada, Las Cruces, Guadalupe y Santa Catarina, se registran formaciones montañosas que promedian los 3 200 msnm, con elevaciones en el oriente de la cuenca que superan los 5 400 msnm. (Figura 3.2).

Por ser la ZMCM una región geográfica rodeada de sierras, constituye una cuenca semicerrada o endorreica, es decir, aquellas en que los ríos y arroyos que escurren desde las partes altas de dichas sierras hasta la llanura lacustre dando lugar a una serie de ciénegas.

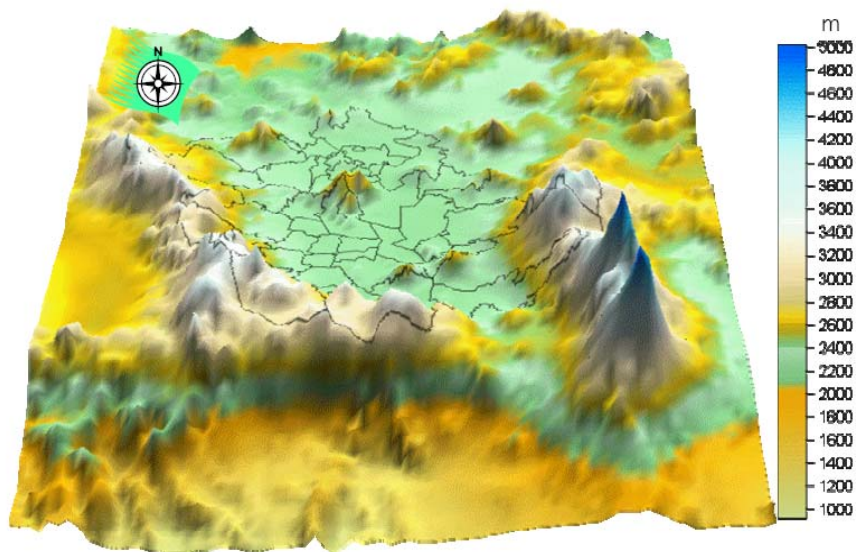
---

<sup>1</sup> Los 59 municipios del Estado de México: Acolman, Amecameca, Apaxco, Atenco, Atizapán de Zaragoza, Atlautla, Axapusco, Ayapango, Coacalco de Berriozabal, Cocotitlán, Coyotepec, Cuautitlán, Cuautitlán Izcalli, Chalco, Chiautla, Chicoloapan, Chiconcuac, Chimalhuacán, Ecatepec de Morelos, Ecatzingo, Huehuetoca, Hueypoxtla, Huixquilucan, Isidro Fabela, Ixtapaluca, Jaltenco, Jilotzingo, Juchitepec, La Paz, Melchor Ocampo, Naucalpan de Juárez, Nezahualcóyotl, Nextlalpan, Nicolás Romero, Nopaltepec, Otumba, Ozumba, Papalotla, San Martín de las Pirámides, Tecámac, Temamatla, Temascalapa, Tenango del Aire, Teoloyucan, Teotihuacán, Tepetlaoxtoc, Tepetlixpa, Tepotzotlán, Tequixquiac, Texcoco, Tezoyuca, Tlalmanalco, Tlalnepantla de Baz, Tonanitla, Tultepec, Tultitlán, Valle de Chalco Solidaridad, Villa del Carbón y Zumpango.



**Figura 3.1. La Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM)**

Fuente: INEGI, Cuaderno Establecimiento de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México 2000



**Figura 3.2. Altitud de la región geográfica de la ZMCM**

Fuente: <http://www.sma.df.gob.mx>

Sujeta a estas características fisiográficas, la calidad del aire de la ZMCM se muestra condicionada de diversas formas:

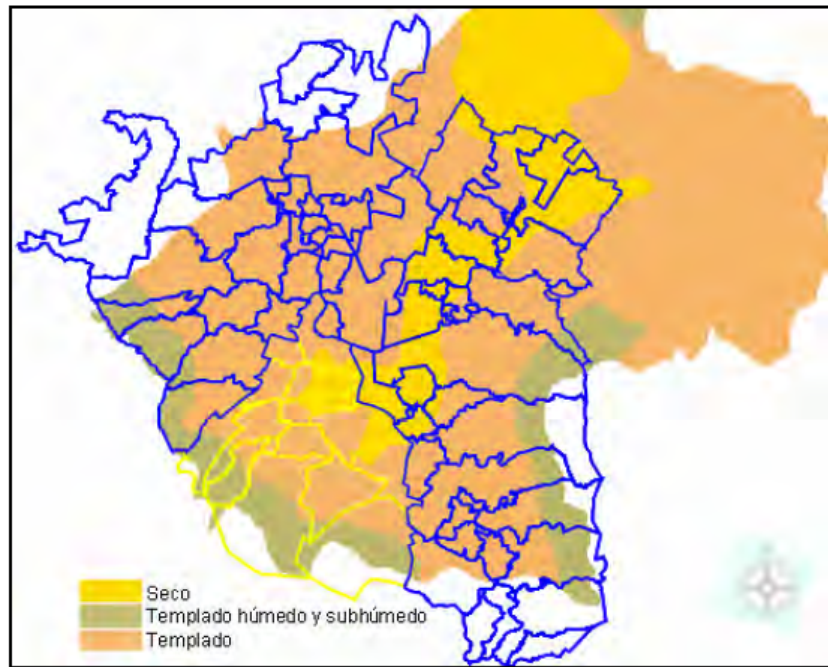
- La cadena montañosa actúa como barrera natural que obstaculiza la circulación del viento.
- Por su ubicación continental entre los océanos Atlántico y Pacífico, la cuenca resulta afectada a lo largo del año por sistemas anticiclónicos (de alta presión), los cuales generan cielos despejados y masas de aire inmóvil
- Como consecuencia de la altitud la concentración de oxígeno en el aire es 23% menor que a nivel del mar, Lo que afecta negativamente la eficiencia de los procesos de combustión.
- Debido a su latitud tropical (19° N), la ZMCM recibe una intensa radiación solar durante todo el año, lo que favorece la actividad fotoquímica de la atmósfera.

Estas condiciones naturales, aunadas a la emisión de toneladas de sustancias que diariamente se arrojan a la atmósfera, como los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos, inevitablemente favorece la producción y acumulación de contaminantes como el ozono y las partículas secundarias (Magaña, 2008, SMA, 2007).

### 3.1.2 FACTORES CLIMÁTICOS

En la cuenca se presentan diversos tipos de subclimas como resultado de las diferencias de relieve y altitud, Las condiciones climáticas de la cuenca establecen una estación húmeda de lluvias y una estación de secas, caracterizada por niveles de humedad bajos.

De acuerdo con los datos climatológicos, en la zona de estudio se presentan tres subtipos de clima, los cuales van desde el templado hasta el frío húmedo. (Magaña, 2008, SMA, 2007).



**Figura 3.3 Subclimas en la ZMCM**

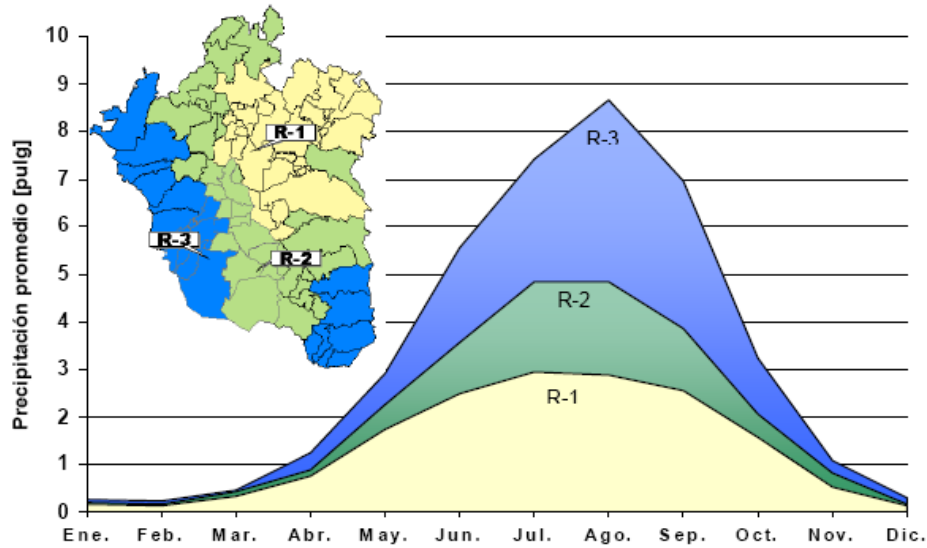
Fuente: Reporte anual de calidad del aire, 2007.SMA; GDF

La temporada de lluvias y humedad alta, se presenta desde mediados de mayo, pero se vuelve más evidente entre junio y octubre, sobre todo en la primera quincena de este último mes, los niveles de precipitación se registran en las zonas más montañosas y los mas bajos en la zona oriente (noreste principalmente) (Magaña, 2008, SMA, 2007).

### 3.1.3 PRECIPITACIÓN PLUVIAL Y HUMEDAD RELATIVA

El aumento de las lluvias en la ZMCM se asocia a la entrada de aire tropical, con alto contenido de humedad procedente del Océano Pacífico, Mar Caribe y Golfo de México, en los meses de junio a septiembre (Magaña, 2008, SMA, 2007).

Es importante mencionar que dentro de la ZMCM, se presentan diferentes patrones de intensidad de lluvias, por lo que a lo largo del año la zona ubicada al Suroeste, es la que recibe la mayor cantidad de precipitación pluvial (Figura 3.4).



**Figura 3.4 Precipitación pluvial mensual promedio por región**

Fuente: Reporte anual de Calidad del aire, 2007.SMA; GDF

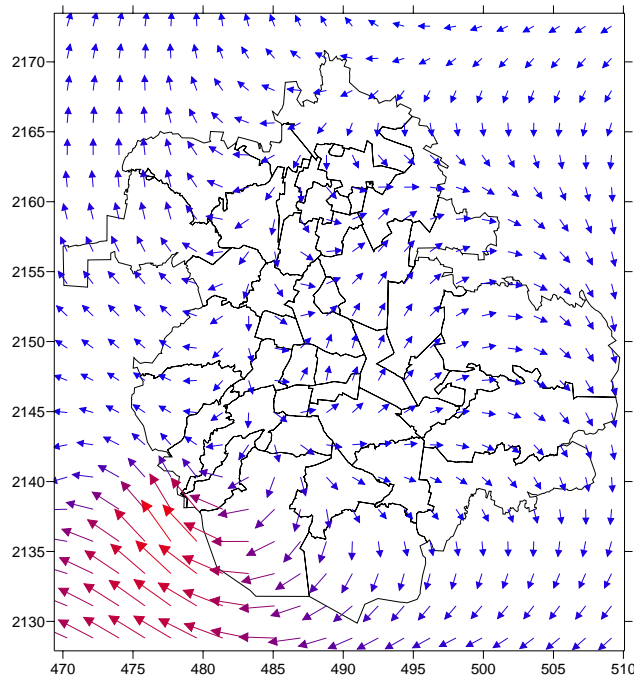
Con respecto a la humedad relativa, se han registrados diversos valores, sin tener un patrón definido durante el día como sucede con la temperatura. Los promedios mensuales indican una diferencia aproximada de 26.8% entre el mes más húmedo (junio) y el mes más seco (febrero), esto es causado fundamentalmente por las masas de aire que afectan al interior del país y a la Cuenca de México durante la temporada mencionada, ya que al ser de tipo marítimo y cálidas, reducen la insolación y a su vez contribuyen a disminuir la formación del ozono, además de provocar lluvias que dan lugar al lavado atmosférico.

### 3.1.3 VIENTO

En la ZMCM la entrada principal del viento se ubica en la zona Norte, región donde el terreno es más plano. Dependiendo de la época del año, la influencia de tales sistemas meteorológicos varía de mayor a menor grado, haciendo que exista una segunda entrada del Norte, cuando el viento en capas medias de la troposfera es suficientemente intenso como para que, a pesar de la barrera montañosa, se imponga esa dirección, sobre todo en los meses invernales. Es necesario remarcar que las dos últimas direcciones descritas

normalmente se presentan en un porcentaje bajo, de tal forma que estos comportamientos no siempre se detectan en estudios que involucren tiempo largo, como sería un análisis anual.

Adicionalmente y dependiendo de las características propias de los sistemas meteorológicos, el conjunto de los rasgos ortográficos de la cuenca, se forman remolinos, líneas con confluencia y zonas de convergencia de viento, mismos que tienden a incrementar la acumulación de los contaminantes (Figura 3.5).



**Figura 3.5 Comportamiento promedio del viento del año 2003**

Fuente "Entradas meteorológicas para el modelo de predicción airshed y estrategias de control"

### 3.2 ESTACIONES DE MUESTREO

El presente trabajo se realizó con la coordinación conjunta del laboratorio de la Sección de Contaminación Ambiental del Centro de Ciencias de la Atmósfera (SCA-CCA) y el Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) del Gobierno del Distrito Federal (GDF), los cuales han mantenido un constante monitoreo del depósito húmedo en la ZMCM.



Correspondiendo al GDF la colección y cadena de custodia de las muestras de depósito húmedo en 16 estaciones a través de La Red Automática de Monitoreo Atmosférico (REDDA), y a la Sección de Contaminación Ambiental, el análisis fisicoquímico de las mismas. La REDDA, cuenta con 16 estaciones de monitoreo ubicadas en puntos estratégicos de la ZMCM, 12 están localizadas en el Distrito Federal y 4 en el Estado de México (Figura 3.7). La mayoría de estas estaciones se encuentran en suelo de conservación y regiones de uso agrícola. Las estaciones de monitoreo cuentan con criterios técnicos para su ubicación; densidad de población, distribución de fuentes de emisión y topografía.

Para cada estación durante la época de lluvias se realiza la colección semanal de depósito húmedo, es por ello que, se agregó una estación de muestreo donde las muestras son colectadas por día. Esta estación pertenece a la Sección de Contaminación Ambiental del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM.

### 3.2.1 ESTRATEGIA DE MUESTREO

La selección de los sitios de muestreo y la instalación de equipo están basadas en el Manual del National Atmospheric Deposition Programa (NADP), cuyo objetivo es la uniformidad de protocolos de muestreo, así como de técnicas y procedimientos analíticos, para poder:

- Designar la ubicación y número de equipos específicos de muestreos de depósito húmedo y seco.
- Verificar de forma continua que los equipos se encuentren en buen estado y buen funcionamiento a través de hojas de información.
- La especificación de un estricto protocolo de muestreo diario o semanal y una clara definición de tipos de muestras.
- Tener un laboratorio control, que permita analizar de forma inmediata las muestras.

### **3.2.2. SELECCIÓN DEL SITIO**

Los lugares de control de las redes de muestreo suelen ser seleccionados para representar áreas fisiográficas principales, la agricultura, zonas acuáticas y forestales dentro de cada estado participante, región o eco región. Siempre que sea posible, los sitios de colección deben incluir locaciones donde existan cuerpos de agua en zonas marinas y costeras, así como otras regiones hidrológicas importantes que puedan estar experimentando los efectos de la contaminación atmosférica.

Una consideración adicional está dada sobre la base del conocimiento disponible de las fuentes de emisión, formas prevaletentes de la deposición, la frecuencia de las precipitaciones y otros procesos meteorológicos y atmosféricos que influyen en el depósito de sustancias en cada área.

Esta información de fondo permite la interpretación significativa de las variaciones espaciales y temporales en la química del depósito atmosférico tanto a nivel nacional como regional.

### **3.2.3 CRITERIOS DE UBICACIÓN DEL COLECTOR Y EL PLUVIÓMETRO**

#### **3.2.3.1 REQUERIMIENTOS REGIONALES**

El colector debe estar ubicado en una zona que tipifique una región y donde el impacto de las fuentes puntuales o de área sea mínimo. El sitio elegido debe proporcionar una representación satisfactoria de las fuentes de depositación. Las fuentes específicas consideradas deben incluir operaciones industriales así como áreas urbanas y sub-urbanas relacionadas con esas fuentes.

El sitio debe estar al menos a 10 km de distancia de plantas de energía eléctrica e Industrias de manufactura, si se tienen fuentes de emisión viento arriba del sitio, la distancia se debe incrementar a 20 km. Este mismo criterio aplica para áreas urbanas y sub-urbanas cuya población es de alrededor de 10,000 habitantes. Para centros de población mayores de 75,000 habitantes que se encuentran viento arriba del sitio de monitoreo, la distancia debe ser de mínimo 40 km.

### 3.2.3.2 REQUISITOS LOCALES

Las fuentes relacionadas con el transporte, operaciones agrícolas y almacenamiento de ciertos tipos de productos constituyen fuentes que dificultan la identificación y cuantificación, una vez que se ha cumplido con los requerimientos regionales. No deben existir fuentes móviles tales como autopistas, caminos de terracería o ríos navegables dentro de una periferia de 100 m alrededor del sitio elegido para la ubicación de la estación de monitoreo. El tráfico local alrededor del sitio puede ser un problema, de modo que la densidad de tráfico vehicular y el tipo de vehículos que circulen en la zona determinará si el sitio es recomendable o no para ser usado como estación. En caso de sitios rurales, la presencia de granjas debe estar al menos a 500 m de distancia de la estación, y animales de pastura o refugios de aves deben estar al menos a 20 m de distancia del sitio.

Las fuentes locales, ya sean puntuales, lineales o de área influyen en la selección del sitio que se pretende elegir como representativo de una región a largo plazo. Se debe considerar también el cambio de uso de suelo en el futuro, por lo que es recomendable tener sitios alternos que puedan ser usados cuando las estaciones actuales en un futuro pierdan su representatividad en una región.

El sitio debe ser accesible, tanto en verano como en invierno y con bajo riesgo de vandalismo. Además, el deberá estar situado para cumplir en la medida de lo posible con lo siguiente:

- El colector debe ser instalado sobre tierras despejadas a nivel de 1 m de altura, en una base de aluminio. Si el lugar cuenta con vegetación natural, el colector debe situarse a una distancia libre mayor a 5 m del pluviómetro pero menor de 30 m y con pendiente de  $\pm 15\%$ . Los cambios repentinos en la pendiente dentro de los 30 m del colector también deben ser evitados.
- La vegetación anual en el sitio debe ser mantenida a menos de 2 metros de altura. Para evitar la acumulación de polvo en las hojas y ramas.

- No debe de existir ningún objeto o estructura sobre el colector. Se recomienda ubicar el colector a una distancia equivalente a dos veces la altura del objeto. Tal que se forme un ángulo de  $30^\circ$  o  $45^\circ$  con respecto a la horizontal y la altura del objeto.

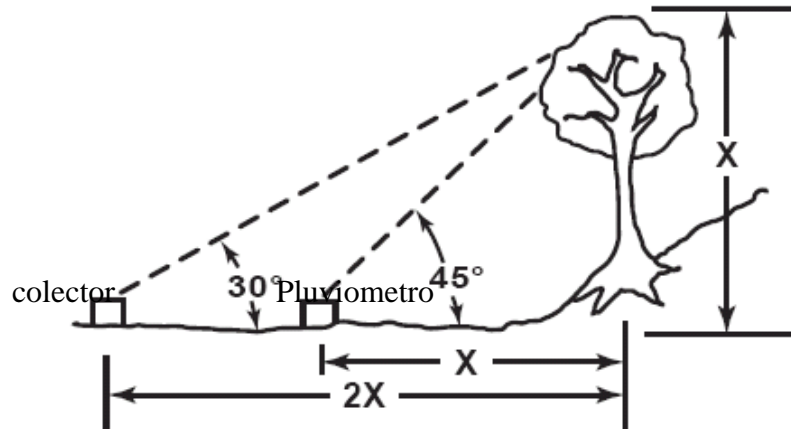
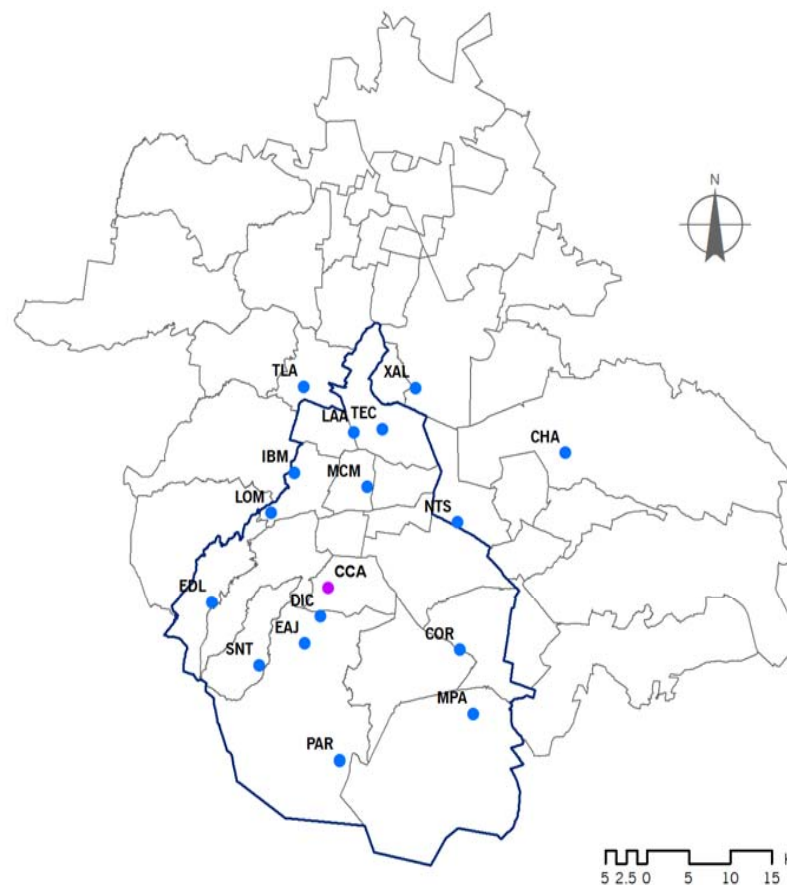


Figura 3.6 Ubicación del colector y pluviómetro, con respecto a objetos y estructuras

Fuente NADP/NTN Manual de selección de sitio e instalación

Figura 3.7. Ubicación de las estaciones de muestreo de depósito húmedo y seco de la REDDA. En La ZMCM

ZONA	DELEGACIÓN O MUNICIPIO	ESTACIÓN	CLAVE
NOROESTE (NO)	Miguel Hidalgo	IBM Legaria	IBM
	Gustavo A. Madero	Lab. de Análisis Ambiental	LAA
	Tlalnepantla	Tlalnepantla	TLA
NORESTE (NE)	Texcoco	Chapingo	CHA
	Nezahualcóyotl	Netzahualcóyotl Sur	NTS
	Gustavo A. Madero	Cerro del Tepeyac	TEC
	Ecatepec de Morelos	Xalostoc	XAL
CENTRO (CE)	Cuauhtémoc	Museo de la Cd. de México	MCM
SUROESTE (SO)	Tlalpan	DICONSA	DIC
	Tlalpan	Ecoguardas Ajusco	EAJ
	Cuajimalpa	Ex convento Desierto Leones	EDL
	Miguel Hidalgo	Lomas	LOM
	Tlalpan	Parres	PAR
	Álvaro Obregón	Pedregal	PED
	Magdalena Contreras	San Nicolás Totolapan	SNT
SURESTE (SE)	Xochimilco	CORENA	COR
	Milpa Alta	Milpa Alta	MPA



**CAPÍTULO 4**

**METODOLOGÍA**

## **CAPÍTULO 4**

### **METODOLOGÍA**

#### **4.1. PROGRAMA DE ASEGURAMIENTO Y CONTROL DE CALIDAD (QA/QC) PARA EL MUESTREO Y ANÁLISIS DEL DEPÓSITO HÚMEDO**

El Aseguramiento de Calidad y el Control de Calidad (QA/QC, por sus siglas en inglés), constituye una parte esencial de todo sistema de medición. Ambos incluyen una secuencia global de actividades, que aseguran que una medición cumpla con normas de calidad definidas dentro de un nivel establecido de confianza. Para ello se desarrollaron reglamentos y protocolos que incluyen procedimientos relativos al muestreo de calidad del aire para la línea de investigación sobre deposición húmeda y seca que se desarrolla en la SCA-CCA.

Previo a la ejecución del programa de medición, se diseñó un programa de monitoreo que consideró un plan de Aseguramiento de Calidad (QA) y Control de Calidad (QC) que permitió obtener datos confiables.

Las actividades de aseguramiento de calidad incluyen las fases previas a las mediciones dentro del monitoreo: la determinación de objetivos y de la calidad de los datos del monitoreo, la designación del sistema, la selección del sitio, evaluación del equipamiento y capacitación de los operadores.

Las funciones de control de calidad comprenden las actividades realizadas para obtener la exactitud y precisión en la medición: operación y mantenimiento, calibraciones y capacitación de los operadores.

Dentro del plan de Aseguramiento de Calidad se establecen los siguientes objetivos: definir los objetivos del monitoreo, definir la calidad de los datos, diseño del monitoreo (contempla el diseño de la red de monitoreo), seleccionar los sitios de

muestreo, evaluar y seleccionar el equipamiento de medición y desarrollar un programa de capacitación. Dentro de los objetivos de Control de Calidad están: preparar protocolos y cadena de custodia para la operación de los sitios y el mantenimiento de los equipos, cronogramas de visitas al sitio, protocolos de inspección, verificación y validación de datos; así también para evaluar la calidad, se debe realizar un cronograma para auditorías en la red y reportes.

Es necesario enfatizar que no se pretende entregar datos de la más alta calidad, sino que se cumplan con los objetivos realistas requeridos de la calidad de los datos.

Las técnicas de muestreo y la medición de parámetros fisicoquímicos, se realizan de acuerdo al Programa Nacional de Depósito Atmosférico (NADP) de los EUA, el cual es similar a la Red de Monitoreo de Lluvia Ácida del Japón (JARN), la Red de Monitoreo de Precipitación y Aire Canadiense (CAPMON), la Red de Monitoreo de Depósito Ácido en el Este de Asia (EANET) y el Programa de Monitoreo y Evaluación en Europa (EMEP) de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (UNECE).

Dentro de las actividades de nuestro programa de Aseguramiento y Control de Calidad en cada etapa de la colección de muestras hasta la entrega de las mismas en el laboratorio, se lleva a cabo a través de una cadena de custodia donde los responsables registran la obtención de muestras, su transporte y entrega de estos al laboratorio, para la realización de su análisis. La Figura 4.1 muestra el protocolo para la recolección de las muestras y su envío al laboratorio para su análisis.



LAB. SCA CCA UNAM

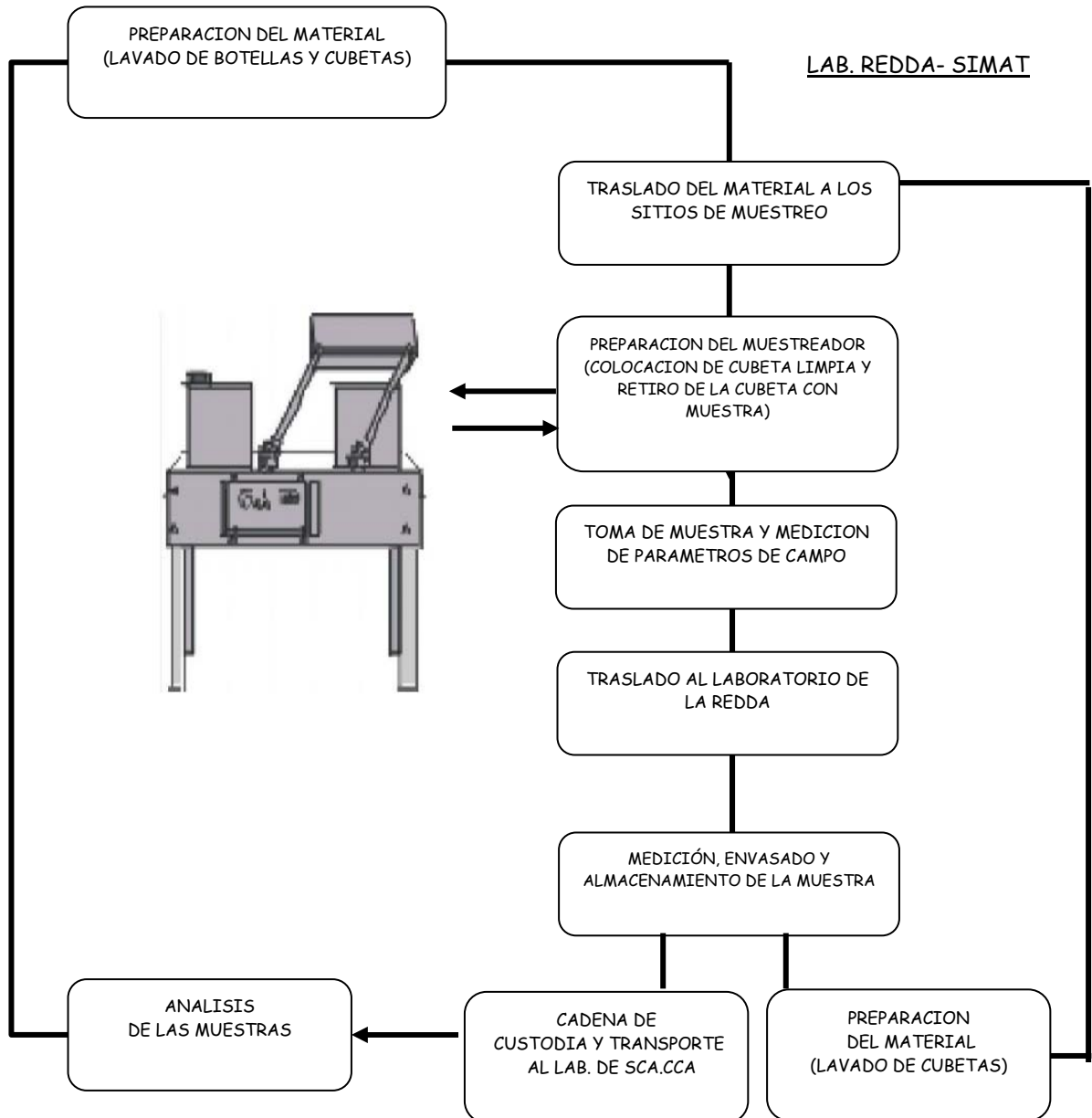


Figura. 4.1 Protocolo de muestreo de depósito húmedo y seco

## 4.2 MUESTREO DEL DEPÓSITO HÚMEDO Y SECO

El sistema de muestreo del depósito húmedo y seco recomendado por la NADP (Programa Nacional de Depósito Atmosférico), consistió en un dispositivo de dos cubetas, en las que se separaba el depósito húmedo del depósito seco.

Este sistema constaba de un mecanismo automático de tapado y destapado que permitía separar el depósito húmedo del seco, evitando su mezclado. El activador de este dispositivo era un sensor que al detectar la ocurrencia de lluvia, enviaba una señal, desplazando la tapa de la cubeta de colección del depósito húmedo, o “lluvia”, quedando en posición abierta; mientras que la cubeta de colección de depósito seco o “polvos”, permanecía cerrada.

Al finalizar el evento de lluvia, el sensor enviaba nuevamente otra señal al mecanismo, lo que permitía cubrir la cubeta de depósito húmedo y por consiguiente destapar la cubeta de depósito seco, de tal forma que ésta última quedaba en posición de muestreo de polvos (Figura 4.2).

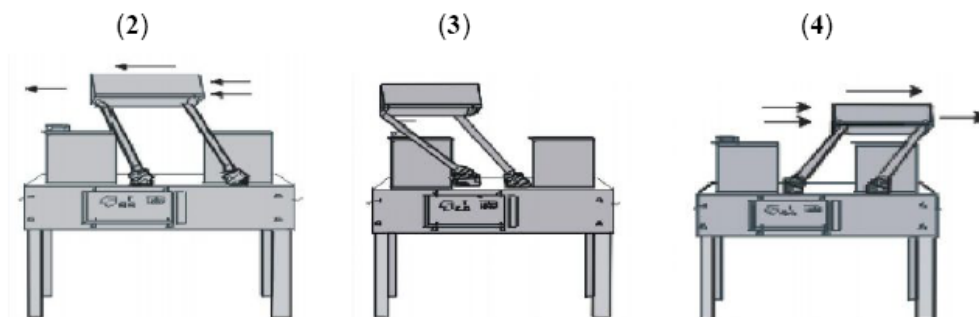


Figura 4.2 Operación del colector de lluvia automático

Con este sistema es muy fácil separar los dos tipos de muestra, ya que si se mezclan, no sería fácil distinguir qué proceso atmosférico incorporó las diferentes especies químicas, ya sea las gotas de lluvia o bien las partículas atmosféricas.

#### **4.2.1 PREPARACIÓN DE MATERIAL EN EL LABORATORIO DE LA SECCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL DEL CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA DE LA UNAM (SCA/CCA/UNAM).**

Los recipientes de colección utilizados (botellas y cubetas), estaban fabricados con polipropileno de alta densidad (Nalgene), material inerte a la composición química de la muestra, lo que evitaba su retención en las paredes del recipiente durante el almacenamiento. Tanto botellas (500 y 60 mL), como las cubetas de colección (6L), eran perfectamente lavadas y enjuagadas con agua destilada y desionizada en el laboratorio de la SCA/CCA/UNAM, para asegurar su limpieza. Posteriormente se transportaban y almacenaban en un sitio limpio y seco, hasta su empleo para el muestreo. Para verificar la limpieza del material, las botellas eran llenadas con 200 mL de agua desionizada, midiendo su conductividad antes del traslado y antes de ser desechada para envasar la muestra. Por experiencia propia se demostró que el lavado de material con jabón alcalino y/o ácido incorporaba iones que alteraban la composición química inicial de la muestra y que dicho lavado, podía sustituirse con enjuagues de agua desionizada caliente, que permitía mantener una diferencia de conductividad menor de 1.15  $\mu\text{S}$ .

#### **4.2.2 OBTENCIÓN Y PRESERVACIÓN DE MUESTRAS**

Botellas y las cubetas eran enviadas a los sitios de muestreo, listas para ser usadas por el personal a cargo de coleccionar el depósito húmedo. El programa de muestreo se adoptó de la experiencia y de las recomendaciones indicadas en la literatura especializada para este tipo de estudios (NADP, 2004; US-EPA 1994), el cual consistió en la colección de muestras acumuladas de deposición húmeda durante 24 horas (1 día) en el caso de SCA-CCA y de 168 horas (7días) para las estaciones pertenecientes a la REDDA.

Para la colección de las muestras del depósito húmedo, se retiraba la cubeta, se trasvasaba parte de la muestra en probeta de 250 mL, se medían pH y conductividad, y el volumen de lluvia de cada muestra mediante un pluviómetro

(mediciones de campo). El resto de la muestra se almacenaba en botellas de 500 ml y tapaba perfectamente. A continuación, la botella se etiquetaba con los datos de campo, tal y como se muestra en Figura 4.3.

CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA  
Sección Contaminación Ambiental

DEPOSITO HÚMEDO  
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

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

**Figura 4.3 Etiqueta de registro para muestras de depósito húmedo**

Posteriormente las muestras se almacenaban en refrigeración a 4°C hasta su envío al laboratorio de la SCA-CCA en un plazo no mayor de una semana

Una vez almacenada la muestra, el operador lavaba la cubeta, usando guantes de nitrilo y agua des ionizada en abundancia. Después de esto, el exceso de agua se eliminaba por sacudimiento y la cubeta se colocaba nuevamente en posición de muestreo en el colector

Se sabe que debido a la naturaleza de la muestra entre el tiempo de colección y el análisis químico, pueden ocurrir cambios de composición química tales como:

- Adsorción y absorción de constituyentes químicos en la superficie de la muestra.
- Cambios en el equilibrio químico entre las fracciones soluble e insoluble.
- Pérdida de agua por evaporación de la muestra.
- Pérdida de constituyentes disueltos por volatilización.
- Oxidación de especies iónicas colectadas inicialmente en su estado reducido.
- Inmovilización microbiana y consumo de elementos esenciales para su crecimiento.

Debido a lo anterior, se procedió a filtrar cada muestra en un plazo no mayor a 9 días a partir de su colección, así como no mayor de un mes para su análisis (Krupa, 2002).

El establecimiento de una cadena de custodia para las muestras, permitió realizar reportes escritos, en los cuales se indicaba: fecha del evento, volumen de lluvia, hora de inicio y final del muestreo, temperatura de la muestra, así como su valor de pH y conductividad medidos al momento de la colección; enumeración de cada muestra, incluyendo número de muestras entregadas, así como observaciones del clima, o de algún evento extraordinario y nombre y firma del responsable del muestreo. Con la finalidad de tener un registro secuencial de todos los muestreos también se llevó una bitácora de muestreo para cada sitio. Dicho reporte era entregado por triplicado y firmado de recibido, por operadores de campo, responsables de transporte de la muestra, y encargado de laboratorio de la SCA-CCA.

#### **4.2.3 TRANSPORTE DE MUESTRAS AL LABORATORIO DE SCA/CCA/UNAM.**

Las muestras eran transportadas en neveras (4 °C) durante todo el trayecto hacia el laboratorio de la SCA-CCA, donde eran recibidas por el químico responsable del laboratorio, junto con la cadena de custodia de las muestras. Los formatos de la cadena de custodia y reporte de muestras se muestran en el Anexo 1

#### **4.3 ANÁLISIS QUÍMICO DE LAS MUESTRAS.**

El análisis químico consistió en la determinación de los siguientes parámetros: pH, conductividad, concentración de cationes:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , y concentración de aniones:  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  así como la alcalinidad expresada como concentración de iones bicarbonato [ $\text{HCO}_3^-$ ].

#### **4.3.1 DETERMINACIÓN DE pH**

Para la determinación del pH en campo y laboratorio se utilizó un Potenciómetro modelo HORIBA D-24. Antes de la medición, el instrumento se calibraba con tres disoluciones buffer de pH=4, pH=7 y pH=10, a una temperatura de 25 °C.

#### **4.3.2 DETERMINACIÓN DE CONDUCTIVIDAD**

Para la determinación de la conductividad en campo y laboratorio, se utilizó un conductímetro HORIBA D-24, que contaba con un termisor. Este aparato medía conductividades en un intervalo de 0.1 $\mu$ s/cm a 199.9  $\mu$ s/cm. El equipo se autocalibraba con dos disoluciones estándar de KCl y NaCl, con conductividades de 1.490  $\mu$ s cm<sup>-1</sup> y 445  $\mu$ s cm<sup>-1</sup> respectivamente, a una temperatura de 25° C.

#### **4.3.3 DETERMINACIÓN DE CONCENTRACIONES DE ANIONES Y CATIONES, POR CROMATOGRAFÍA DE LÍQUIDOS DE ALTA EFICIENCIA (CLAE).**

La técnica analítica instrumental para la identificación y cuantificación de los iones de nuestro interés, se basó en el Método EPA 300.1 , el cual utiliza como método de separación la Cromatografía de Líquidos de Alta Eficiencia (CLAE o HPLC por sus siglas en inglés), adecuando el equipo y las condiciones cromatográficas al laboratorio de la SCA -CCA.

La muestra previamente filtrada a través de una membrana de 0.2  $\mu$ m, se introdujo al sistema cromatografico por un inyector cuyo "loop" tiene una capacidad de 100  $\mu$ L, dicha muestra es llevada por presión mediante una corriente de la fase móvil (FM) hacia el interior de la columna o fase estacionaria (FE), ahí los analitos de la muestra se distribuyen entre la FM y la FE, y su separación se lleva a cabo por diferencia de carga y tamaño; los que presentan mayor afinidad por la FE requieren de mayor tiempo para salir o eluir. La respuesta se mide a través de un detector de

conductividad, cuyo principio se basa en la medición de la diferencia de conductividad de la FM y la FE más la muestra; esta diferencia se amplifica y se envía como señal a un registrador, donde la señal eléctrica es registrada como un pico en el recorrido del dispositivo.

#### 4.3.3.1 CONDICIONES CROMATOGRÁFICAS EXPERIMENTALES.

Para la cuantificación de los iones en las muestras, se utilizó un Cromatógrafo de Líquidos con detector de conductividad. A continuación se describen las características de algunos componentes básicos del cromatógrafo:

- Bomba Waters, modelo 510 HPLC pump, de doble pistón, con un intervalo de presión de 0-6000 psig.
- Detector de conductividad Waters 432
- Integrador de datos. Waters 746
- Columnas:
  - a) Para aniones se utiliza una columna HAMILTON PRP-X100 de alta resolución, con un diámetro interno de 4.6 mm, un diámetro externo de 75 mm y 15 cm de longitud. El material de empaque, es una resina de polimetacrilato con un grupo funcional de amonio cuaternario enlazado. El tamaño de la partícula es de 6  $\mu\text{m}$  y la capacidad es de  $30\pm 3 \mu\text{eq/ml}$ .
  - b) Para cationes se utiliza una columna Waters cationes M/D, con diámetro interno de 4.6 mm, diámetro externo de 50mm y 15 cm de longitud, con tamaño de partícula de 10  $\mu\text{m}$  y una capacidad de  $12.0\pm 0.2 \mu\text{eq/L}$ . El material de empaque es una resina de divinilbenceno-estireno con un grupo funcional de ácido sulfónico enlazado.

Las condiciones cromatográficas para la determinación de las concentraciones de aniones y cationes, se muestran en la siguiente tabla, siendo las mismas cuando se realizó la curva patrón de aniones y de cationes.

Tabla 4.1

**Condiciones Cromatográficas Experimentales Para La Determinación De Aniones Y Cationes.**

	ANIONES	CATIONES
Fase Móvil	Ac. Ftálico /acetona al10% ajustada a pH de 5.0	EDTA/HNO <sub>3</sub> (100mM/3mM)
Columna	Anionica PRP-X100 Hamilton. 4.6 mm x 75 mm ,15 cm long Tamaño partícula 6 µm Capacidad 30± 3 µeq /mL Resina de polimetacrilato con un grupo funcional de amonio cuaternario	Catiónica M/D Marca Waters IC-PACK 3.9 X150mm Tamaño partícula 5 µm Capacidad 1.5± 0.2 µeq/mL Base de sílica empaquetada con polibutadieno / copolimero de ácido maleico
Flujo de la columna	2 ml/min	1 ml/min
Conductividad del Eluyente	570 µS	985 µS

Se utilizaron reactivos de alta pureza para la preparación de las disoluciones. En cuanto al agua utilizada para todo el análisis, ésta fue des ionizada y filtrada a través de un filtro Millipore de 0.22 µm, para eliminar cualquier posible impureza.

Los recipientes y material utilizado para la preparación de las disoluciones fueron de polietileno de alta densidad, para evitar contaminaciones, previamente lavado y cuya conductividad del agua contenida fue menor a 1 µS/cm.

#### 4.3.4 MEDICIÓN DE ALCALINIDAD

La alcalinidad generalmente se expresa como los micro equivalentes de H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> necesarios para llevar un litro de disolución a pH de 4.5. Para su determinación se utilizan métodos volumétricos (fenoftaleina y anaranjado de metilo) y métodos potenciométricos. Para este estudio, se utilizó el Método Gráfico de Gran, cuya singularidad radica en hallar el punto final de equivalencia, utilizando datos en la vecindad de pH 4 – 5.



#### **4.4 VALIDACION Y MANEJO DE DATOS**

Previo a la entrega de cualquier reporte, se sometieron los resultados a validación, la cual consistió en tres etapas: La primera de ellas fue realizar un análisis comparativo entre los datos obtenidos en campo y los medidos en laboratorio. La siguiente etapa consistía en comparar las conductividades medidas a las muestras contra las conductividades obtenidas de forma teórica, con las concentraciones determinadas de cada ión, haciendo énfasis en el balance iónico para asegurar la cuantificación completa de los iones y por último la revisión y rechazo de datos cuando existían anormalidades en el muestreo o en el análisis mismo, asegurando con ello los objetivos realistas requeridos de la calidad de los datos.

**CAPÍTULO 5**  
**RESULTADOS**

## CAPÍTULO 5

### RESULTADOS

La meta de este trabajo fue identificar los eventos de depósito húmedo con valor de pH menor a 5.6 (lluvia ácida) e identificar las regiones de mayor impacto en las que se presenta este fenómeno dentro de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM); determinar las concentraciones de los iones inorgánicos presentes, los cuales fueron seleccionados basados en su abundancia relativa (Charlotte, 2001). Destaca la importancia de la cuantificación de los iones  $\text{SO}_4^{=}$  y  $\text{NO}_3^{-}$ , que son productos secundarios de sus precursores ( $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_2$ ) en la atmósfera, así como, la determinación de las posibles fuentes de origen de dichos precursores trazando trayectorias de retroceso.

#### 5.1 DETERMINACION DE pH

Después de la obtención de las muestras en campo y dentro de los primeros siete días posteriores a su recepción, se midieron pH y conductividad, lo que permitió identificar los eventos de lluvia ácida.

Durante éste periodo, se analizaron 2662 muestras, los resultados mensuales para cada estación se muestran en el Anexo 1.

En todas las regiones de muestreo se identificaron eventos de depósito húmedo con carácter ácido. En la región Suroeste (SO), se presentó el mayor porcentaje de éstas muestras; cerca del 40% del total de los eventos colectados (Figura 5.1).

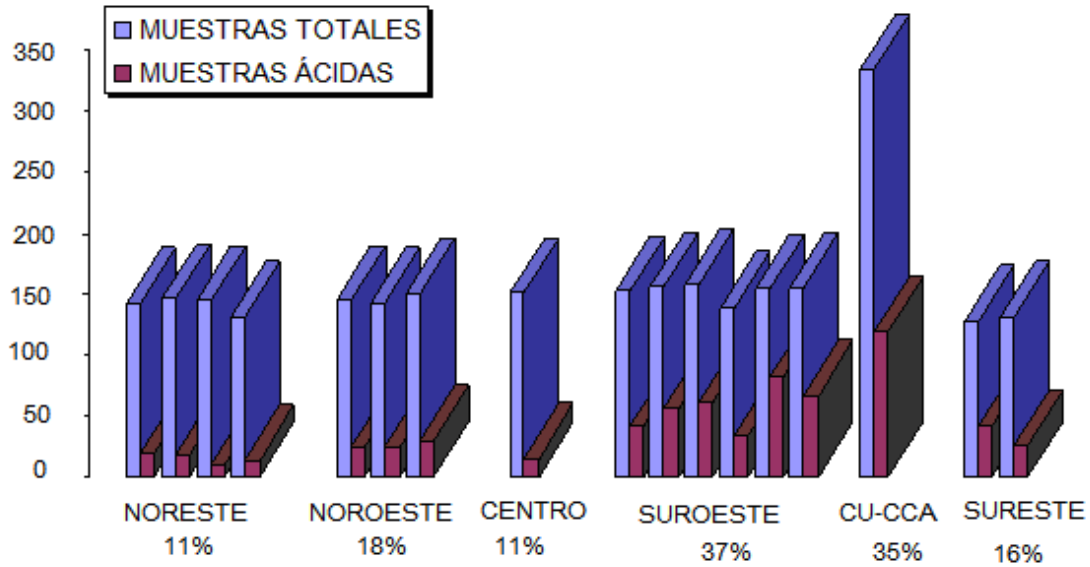


Figura 5.1 Eventos de depósito húmedo registrados en la campaña 2003 – 2009

A lo largo del estudio, se observaron diferentes patrones de intensidad de lluvia en la ZMCM, siendo la región Suroeste, la que recibe mayor cantidad de precipitación. Entre las estaciones destaca EDL, cuya media mensual fue de 227.8 L/m<sup>2</sup> (Figura 5.2).

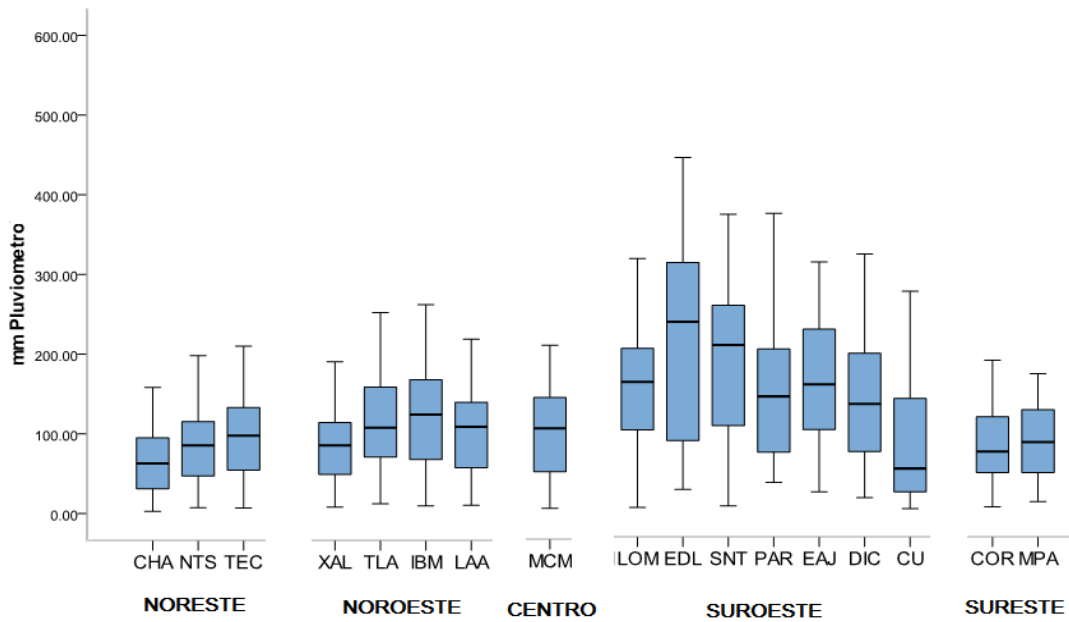


Figura 5.2 Precipitación pluvial por estación en la ZMCM. 2003-2009.

Los resultados se clasificaron en 4 grupos, que representan las regiones de la ZMCM en las cuales se ubicaron las estaciones de monitoreo: Noroeste (NO), Noreste (NE), Centro (C), Suroeste (SO) y Sureste (SE). A continuación:

### 5.1.1 REGIÓN NORESTE (NE)

La región NE esta integrada por las estaciones Nezahualcoyotl Sur (NTS), Cerro del Tepeyac (TEC) , Xaloxtoc (XAL) y Chapingo (CHA) (Figura 5.3). Las cuales abarcan el Municipio de Ecatepec de Morelos y Nezahualcoyotl así como la delegación Gustavo A. Madero.

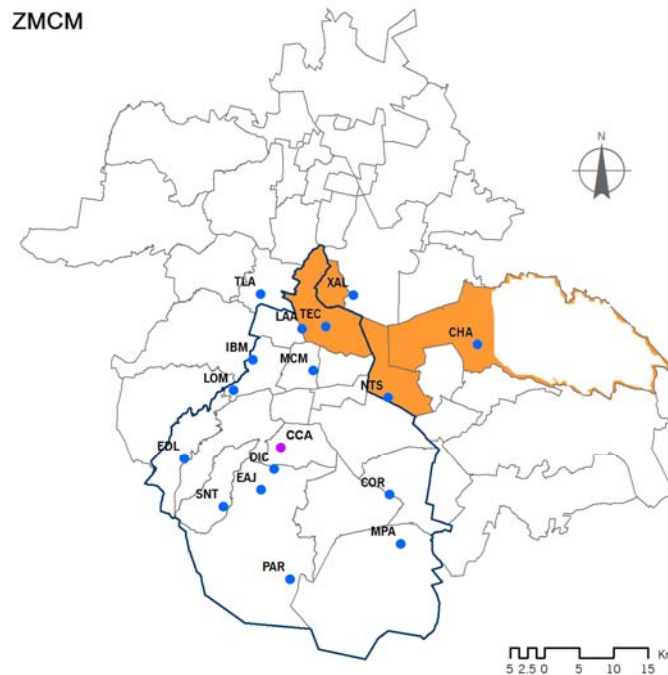


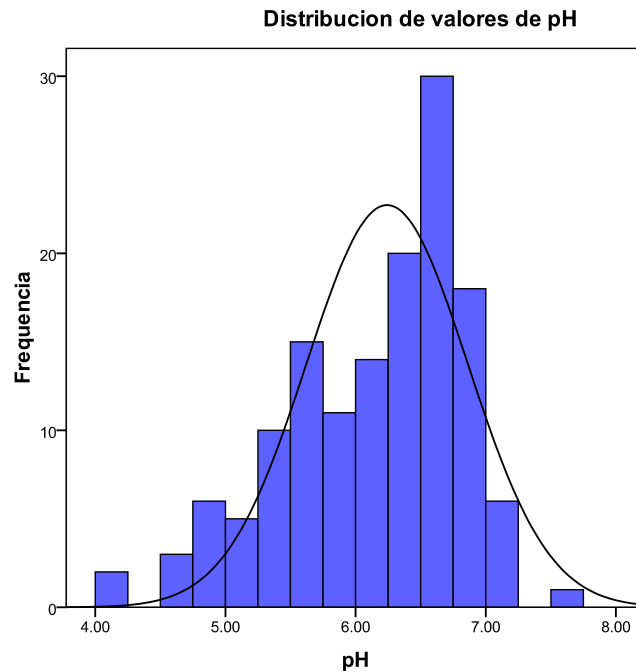
Figura 5.3 Ubicación de las estaciones de muestreo de la región Noreste (NE)

La colección y análisis de las muestras de depósito húmedo para la región Noreste, se llevó a cabo desde la segunda semana de Mayo del año 2003 hasta la primera semana de Noviembre de 2009. Se obtuvieron un total de 564 muestras analizadas, de las cuales 11% presentaron valores de pH menores a 5.6 y más del 75% de las muestras mostraron valores de pH superiores a 6.5 (Tabla 5.1).

**Tabla 5.1 Número de muestras de depósito húmedo colectadas en la región NE durante la campaña de muestreo 2003-2009**

ESTACIÓN	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	TOTAL	PH < 5.6	
TEC	21	23	16	20	21	21	20	142	20	14.0%
NTS	20	20	19	21	22	22	22	146	19	13.0%
XAL	22	23	17	20	23	20	20	145	11	7.6%
CHA	17	17	18	19	25	18	17	131	14	10.7%
TOTAL								564	64	11.0%

La distribución observada de los valores de pH, fue de 4.04 a 7.59, con frecuencia mayoritaria en los valores de 6.40 a 6.90, se aplicó una prueba de Kolmogorov-Smirnov, cuyo resultado no mostró diferencias significativas con una distribución tipo Normal (Figura 5.4)



**Figura 5.4 Distribución de los valores de pH ponderado mensual en la región Noreste**

Para el análisis de los datos, se trabajó con el valor ponderado mensual para cada año, calculado para cada estación; lo que resume el número de datos a 40 ó 41 por estación. Posteriormente se obtuvo el valor de pH ponderado anual y el valor ponderado para un periodo de 7 años (2003-2009) (Tabla 5.2).

Para obtener el valor ponderado (mensual, anual o por periodo), se consideró cada evento con su respectivo volumen de lluvia y se relacionó con el volumen total correspondiente (mes, año o periodo), de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\text{Valor Ponderado} = \sum_{i=1}^n \frac{X_T}{X_i} * Y \quad \text{Ec. (5.1)}$$

Donde:

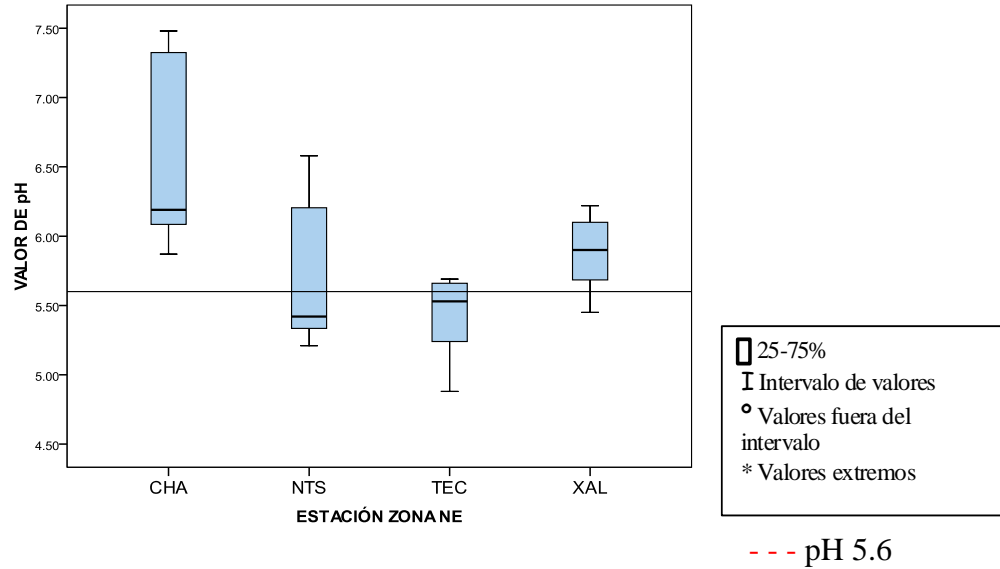
Y = parámetro a ponderar

Xi = volumen (i) de evento (i)

XT = volumen total (mes, año, periodo)

**Tabla 5.2 Variación del valor de pH ponderado anual para las estaciones de la región NE durante la campaña de muestreo 2003-2009**

CLAVE	pH PONDERADO ANUAL									PONDERADO 7 AÑOS
	MIN	MAX	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	
TEC	4.88	6.76	6.76	5.69	5.63	4.88	5.13	5.53	5.35	5.34
NTS	5.21	6.58	6.58	6.14	6.27	5.39	5.28	5.21	5.42	5.51
XAL	5.45	6.77	6.77	6.22	5.98	5.56	5.45	5.90	5.81	5.82
CHA	5.87	7.48	7.48	7.25	7.40	6.09	6.19	6.08	5.87	6.28



**Figura 5.5. Variación del valor de pH ponderado anual para las estaciones de la región Noreste durante la campaña de muestreo 2003-2009**

La región Noreste se caracteriza por ser de tipo urbana principalmente habitacional y comercial, cuyas avenidas principales van de flujo vehicular moderado a alto. Para las estaciones localizadas en esta región, se observó que la mayor proporción de muestras con carácter ácido se presentó en la estación Cerro del Tepeyac (TEC) (Figura 5.5), ubicada en la delegación Gustavo A. Madero que ocupa una posición estratégica con respecto a varios municipios conurbados del Estado de México; ya que se encuentra atravesada y/o limitada por importantes arterias viales que conectan la región central con la región norte del área metropolitana, tales como son: Insurgentes Norte, que se prolonga hasta la carretera a Pachuca, el Eje 3 Oriente (Avenida Eduardo Molina), el Eje 5 Norte (Calzada San Juan de Aragón); que conecta con la Avenida Hank González o Avenida Central; en la zona poniente de la delegación se ubican la Calzada Vallejo, el Eje Central Lázaro Cárdenas (Avenida de los Cien Metros) y el Anillo Periférico Norte.1(INEGI,2010).

Por otra parte, los valores ponderados anuales de la estación CHA mostraron diferencias significativas con las otras estaciones incluidas en la región Noreste. Se aplicó una prueba estadística ANOVA de un factor suponiendo una “Distribución Normal” y que las varianzas de



XAL, NTS Y TEC eran iguales. La prueba confirmó la existencia de diferencias significativas. De acuerdo a lo mostrado en la Figura 5.1, la estación CHA a diferencia de las otras está ubicada en un área rural, con actividad agrícola, dentro del campus del Colegio de Posgraduados Chapingo. Esta estación se encuentra viento arriba, por lo cual, puede ser considerada una estación que mide la concentración de fondo.

De los datos obtenidos, se seleccionaron los eventos cuyos valores de pH fueron extremos o aberrantes; destacaron los datos del año 2007, en el cual, durante cuatro meses se presentaron valores ponderados ácidos en la estación CHA; para las estaciones XAL y TEC, destacaron los años 2006 y 2008, y para la estación NTS el año 2009 (Anexo 2).

### 5.1.2 REGIÓN NOROESTE (NO)

Esta región está conformada por las estaciones IBM Legaria (IBM), Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA) y Tlanepantla (TLA), ubicadas en las delegaciones Miguel Hidalgo, Azcapotzalco, Gustavo A. Madero y el Municipio de Tlanepantla (Figura 5.6). Durante el estudio se analizaron un total de 437 muestras de las cuales 80 presentaron valores de  $\text{pH} \leq 5.6$  (18.3%).

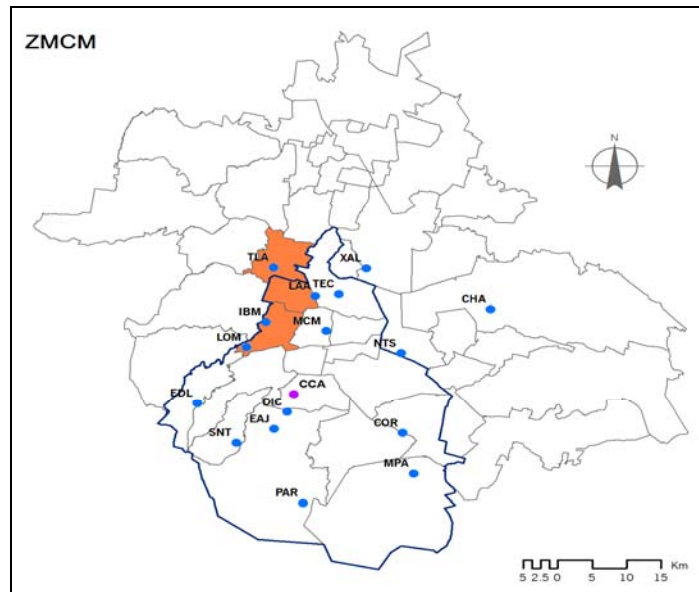


Figura 5.6 Ubicación de las estaciones de muestreo de la Región Noroeste (NO)

La distribución observada de los valores de pH, fue de 4.39 a 7.31, con frecuencia mayoritaria en los valores de 6.30 a 6.70, se aplicó una prueba de Kolmogorov-Smirnov, cuyo resultado no mostró diferencias significativas con una distribución tipo Normal (Figura 5.7)

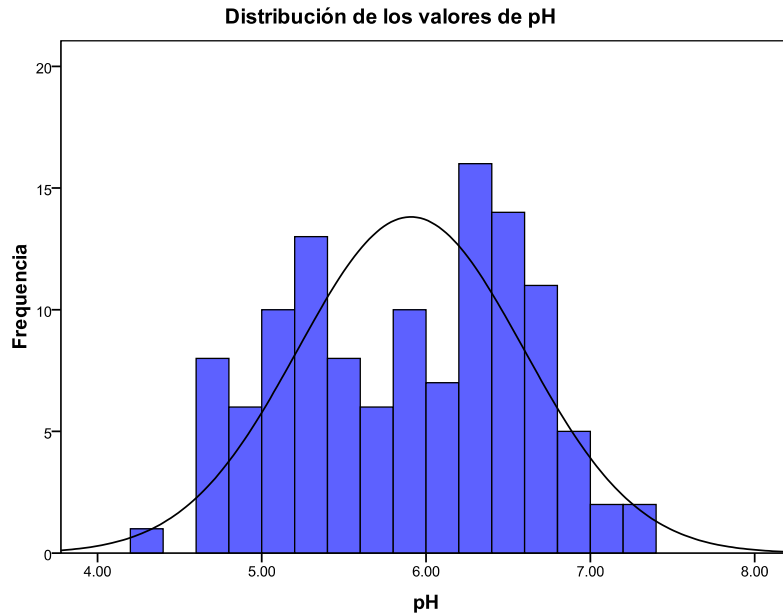


Figura 5.7 Distribución de los valores de pH ponderado mensual en la región Noroeste

Como se observa en la Tabla 5.3, la estación donde se registraron más muestras con carácter ácido fue la estación Tlalnepantla (TLA), ubicada en el municipio del mismo nombre, en el Estado de México.

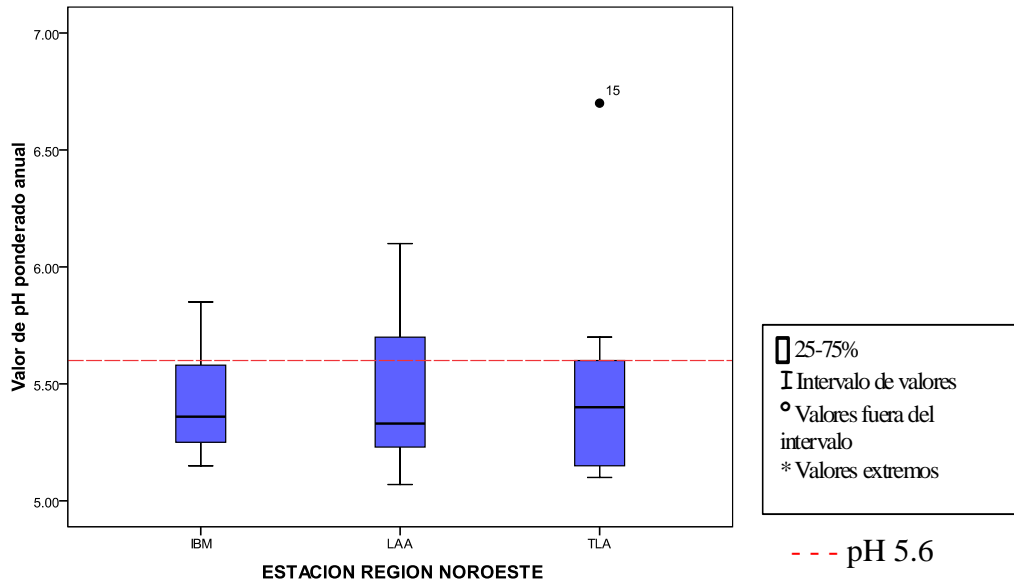
Tabla 5.3 Número de muestras de depósito húmedo colectadas en la Región NO durante la campaña de monitoreo 2003-2009

ESTACIÓN	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	TOTAL	PH < 5.6	
TLA	20	22	20	20	21	22	20	145	30	20.68 %
LAA	20	23	17	20	21	22	19	142	25	17.60 %
IBM	18	23	20	21	24	22	22	150	25	16.66 %
TOTAL								437	80	18.30 %

También se obtuvo el valor de pH ponderado anual y por periodo para cada estación (Tabla 5.4), se observó, que a partir del año 2005 el pH ponderado anual de estas estaciones disminuyó, siendo el valor mínimo de pH ponderado anual de 5.10, en la estación Tlalnepantla (TLA) (Tabla 5.4), sin embargo, el valor de pH ponderado anual de las otras estaciones, no resultó significativamente diferente al de ésta estación (Figura 5.8).

**Tabla 5.4 Variación del valor de pH ponderado anual para las estaciones de la región Noroeste (NO)**

CLAVE	MIN	MAX	pH PONDERADO ANUAL							PONDERADO 6 AÑOS
			2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	
IBM	5.15	5.85	5.85	5.61	5.55	5.36	5.22	5.28	5.15	5.40
LAA	5.20	6.10	6.10	5.65	5.75	5.07	5.33	5.20	5.26	5.37
TLA	5.10	6.70	6.70	5.50	5.70	5.10	5.10	5.20	5.40	5.40



**Figura 5.8. Variación del valor de pH ponderado anual para las estaciones de la región Noroeste durante la campaña de muestreo 2003-2009**

Como se observó en la Figura 5.8, la distribución presenta dos máximos, uno de ellos en 5.34 y el otro en 6.6, considerando la contribución de los volúmenes de lluvia, los valores de pH menores de 5.6, tienen la mayor contribución al valor de pH ponderado anual. Distinguiéndose la estación de Tlalnepantla, por ser una de las mayores regiones industrializadas, con gran actividad de servicios y comercios.

De la misma forma que en la región Noreste, en la región Noroeste se seleccionaron aquellos datos que fueron ácidos, para su posterior análisis. Estos datos se muestran en el Anexo 2.

### 5.1.3 REGIÓN CENTRO (C)

La región Centro se muestreó a través de la estación ubicada en la azotea del Museo de la Ciudad de México (MCM), ubicada en la Delegación Cuauhtémoc (Figura 5.9). El Museo de la Ciudad de México se encuentra en un área urbana de actividad comercial, turística, cultural y de servicios, sobre la Avenida Pino Suárez que presenta flujo vehicular alto de autos particulares, taxis, microbuses, pick-up, camiones de carga y motocicletas.

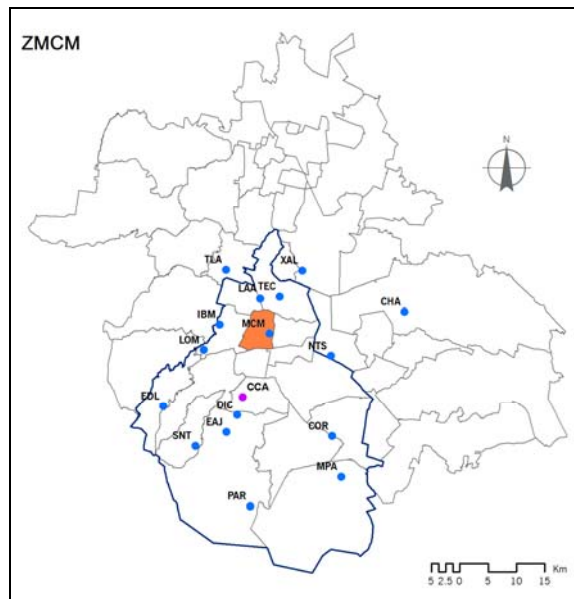


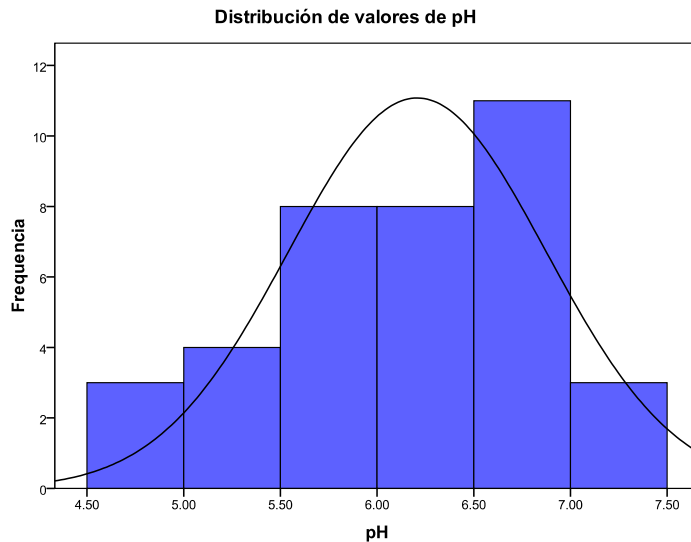
Figura 5.9 Ubicación de la estación de muestreo de la Región Centro (C)

Durante la campaña de muestreo, se analizaron 151 muestras de las cuales 16 presentaron carácter ácido (10.60%), (Tabla 5.5). Los valores de pH determinados en esta región fueron en un intervalo de 4.5 a 7, y las mayores frecuencias se observaron en los valores de 6.5 a 6.8 (Figura 5.10).

**Tabla 5.5**

**Número de muestras de depósito húmedo colectadas en la Región Centro (C) durante la campaña de muestreo 2003-2009**

ESTACIÓN	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	TOTAL	PH < 5.6
MCM	22	23	18	21	23	23	21	151	16
TOTAL								151	16 10.60%



**Figura 5.10 Distribución de los valores de pH ponderado mensual en la región Centro**

Para esta estación también se observaron valores de  $pH \leq 5.6$ , entre los que destacó un valor de 3.21, este valor se presentó de forma anómala en el mes de mayo, que comúnmente se distingue por ser inicio de temporada de lluvias, y en los cuales resulta poco probable encontrar

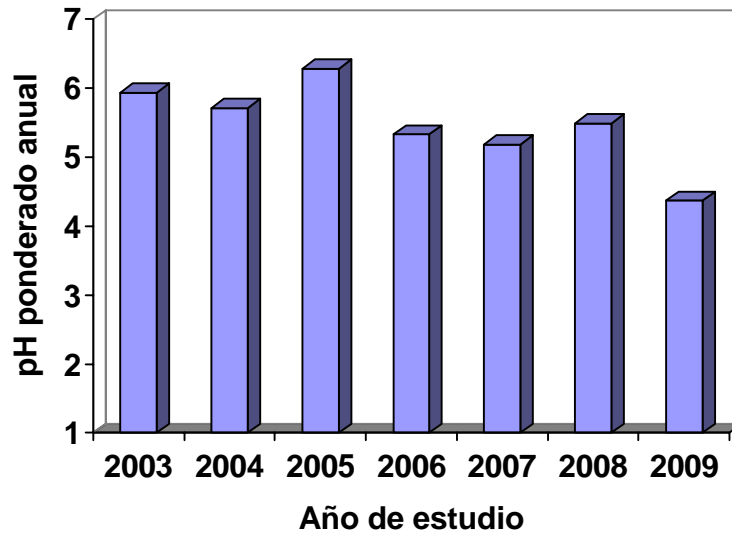
eventos ácidos debido a la ocurrencia de reacciones de neutralización por la presencia de partículas. De acuerdo al histograma, los eventos ácidos registrados fueron pocos, pero sus volúmenes de lluvia fueron mayores, por lo cual influyeron mayoritariamente en el valor de pH ponderado anual y por periodo.

Con respecto al pH ponderado anual, éste se incrementó durante el periodo de estudio (Tabla 5.6 y Figura 5.11).

**Tabla 5.6**

**Variación del valor de pH ponderado para la estación de la Región Centro (C) durante la campaña de muestreo 2003 - 2009**

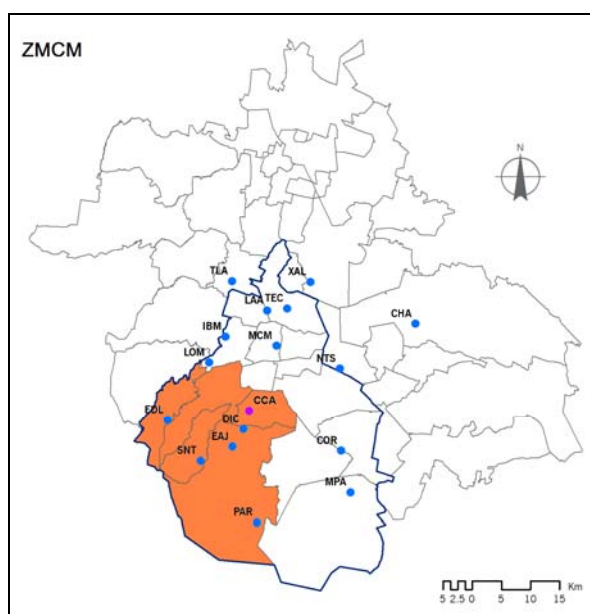
CLAVE	MIN	MAX	pH PONDERADO ANUAL							PONDERADO 6 AÑOS
			2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	
MCM	4.37	6.28	5.93	5.71	6.28	5.33	5.18	5.49	4.37	5.07



**Figura 5.11 Valores de pH ponderado anual de la Región Centro**

### 5.1.4 REGIÓN SUROESTE (SO)

La región Suroeste se conformó por las estaciones Diconsa (DIC), Ecoguardas Ajusco (EAJ), Ecoguardas Desierto de los Leones (EDL), Lomas (LOM), Parres (PAR), San Nicolás Totoloapan (SNT), ubicadas en suelo de conservación. Adicionalmente se trabajó con la estación de la Sección de Contaminación Ambiental del Centro de Ciencias de la Atmósfera, ubicada en Ciudad universitaria (CU-CCA) (Figura 5.12), la cual fue denominada estación control.

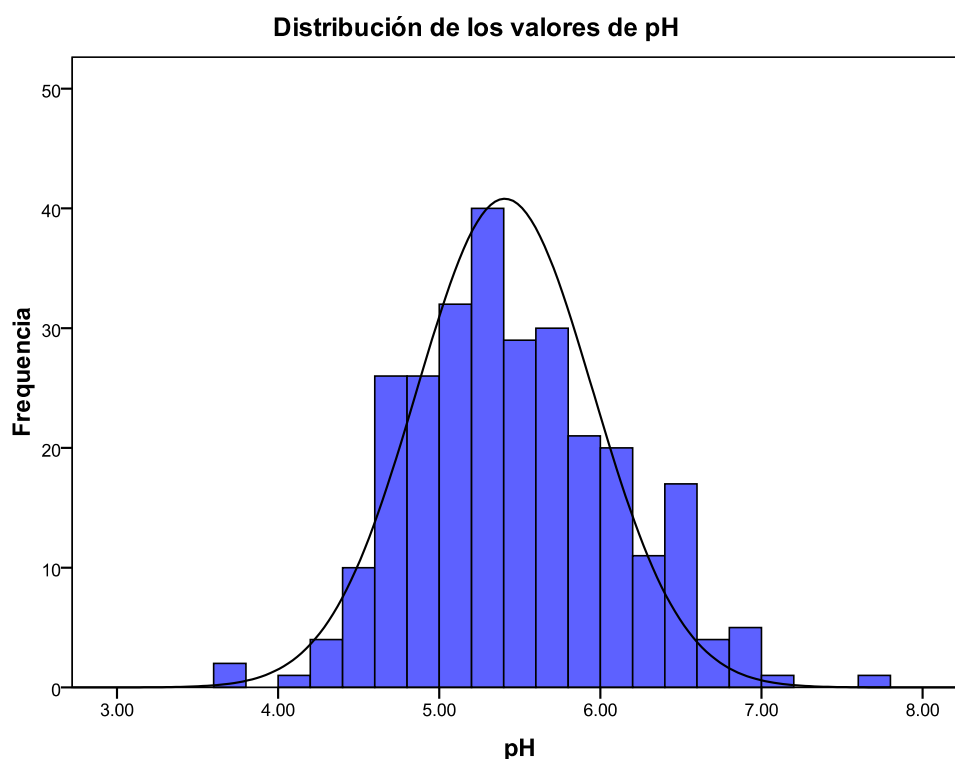


**Figura 5.12 Ubicación de las estaciones de monitoreo de la Región Suroeste (SO)**

Para la región Suroeste se analizaron 1251 muestras de las cuales el 37.09 % presentó valores de pH menores a 5.6 (Tabla 5.7). Los valores de pH registrados en la región Suroeste se encuentran en un intervalo de 3.66 a 7.80 y la mayor frecuencia entre 5.2 y 5.4 (Figura 5.13). Cabe mencionar que en la estación de CU-CCA, el muestreo de los eventos se realizó por día, en comparación con la recolección semanal realizada por los técnicos de campo, de la Red de Depósito Atmosférico (REDDA).

**Tabla 5.7 Número de muestras de depósito húmedo colectadas en la Región SO durante la campaña de monitoreo 2003-2009**

ESTACIÓN	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	TOTAL	PH < 5.6	
DIC	19	23	22	21	23	24	21	153	42	27.45%
EAJ	21	23	22	22	23	24	21	156	57	36.53%
EDL	21	22	24	21	23	24	23	158	62	39.24%
LOM	16	23	19	21	20	20	20	139	35	25.18%
PAR	18	23	23	22	23	21	22	154	82	53.25%
SNT	21	23	21	22	20	24	24	155	67	43.23%
CU-CCA	54	48	39	37	41	72	42	333	119	35.74%
TOTAL								1251	464	37.09%



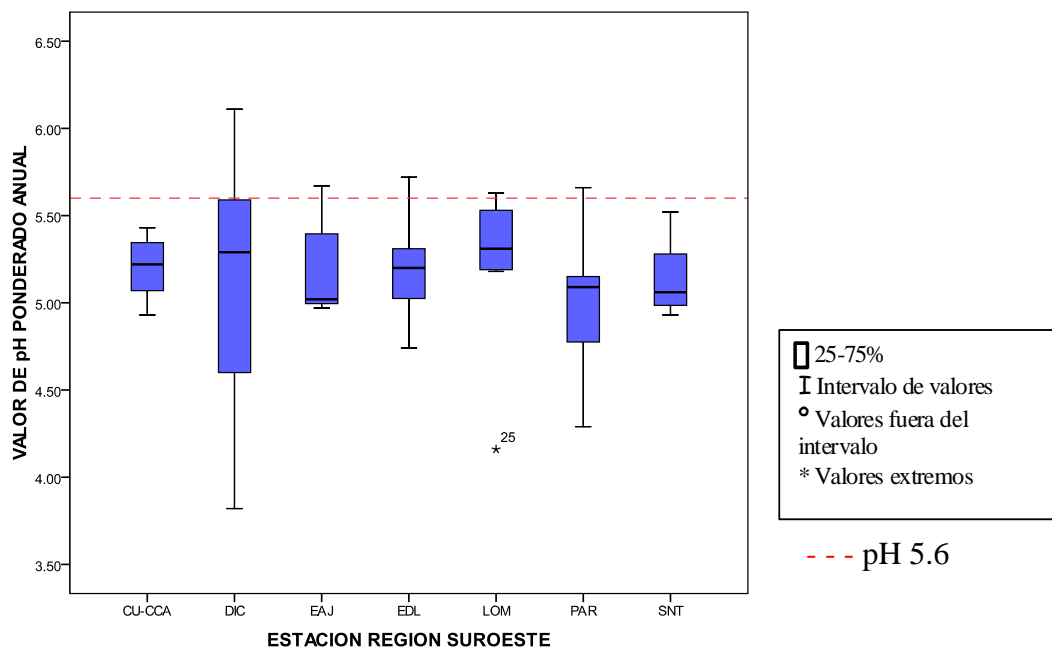
**Figura 5.13 Distribución de los valores de pH ponderado mensual en la región Suroeste**

Con respecto a los valores de pH ponderado anual, éstos fueron los de carácter más ácido de toda la zona de estudio. El valor mínimo de pH ponderado registrado durante el muestreo fue de 3.82; mientras que, el valor de pH ponderado de 7 años para tres de las siete estaciones fue 4.41 (Tabla 5.8 y Figura 5.14).



**Tabla 5.8 Variación del valor de pH ponderado para las estaciones de la Región Suroeste (SO) durante La campaña de muestreo 2003 - 2009**

CLAVE	MIN	MAX	pH PONDERADO ANUAL							PONDERADO 6 AÑOS
			2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	
DIC	3.82	6.11	6.11	5.46	5.72	5.29	4.10	3.82	5.10	4.41
EAJ	4.97	5.67	5.57	5.02	5.67	5.22	5.01	4.98	4.97	5.16
EDL	4.74	5.72	5.72	5.20	5.22	4.74	4.91	5.14	5.40	5.12
LOM	4.16	5.63	5.60	5.20	5.46	4.16	5.18	5.63	5.31	4.80
PAR	4.29	5.66	5.66	5.12	5.18	4.29	4.67	4.88	5.09	4.76
SNT	4.93	5.52	5.41	5.02	5.52	4.95	5.15	4.93	5.06	5.10
CU-CCA	4.93	5.43	5.01	5.43	5.27	5.22	5.42	4.93	5.13	5.21



**Figura 5.14. Variación del valor de pH ponderado anual para las estaciones de la región Noreste durante la campaña de muestreo 2003-2009**

Como se puede observar en la Figura 5.14, la estación Diconsa (DIC) presenta mayor variación en los valores de pH y también en ella se registró el valor más bajo de pH ponderado anual. También se observa que, el valor de la mediana en pH ponderado de la región Suroeste es semejante entre las estaciones, en este sentido, se aplicó una prueba estadística ANOVA de un factor, para verificar la existencia de diferencias significativas. El resultado indicó que estadísticamente no existen diferencias significativas entre dichas medias. Con el propósito de evitar la ocurrencia de error de tipo II (aceptar la hipótesis nula cuando es falsa, dado que las varianzas no cumplen con el principio de homocedasticidad), se aplicó una prueba estadística posteriori de Turkey, la cual demostró que no existen diferencias significativas entre ellas.

En la descripción de las regiones anteriores se mostró un listado por año de aquellos meses cuyo valor ponderado de pH fue menor a 5.6, para esta región la lista es bastante extensa y también se presenta en el Anexo 2.

### 5.1.5 REGIÓN SURESTE (SE)

La región Sureste esta conformada por las estaciones de Milpa Alta (MPA) y CORENA (COR), ubicadas en las delegaciones Xochimilco y Milpa Alta (Figura 5.15).

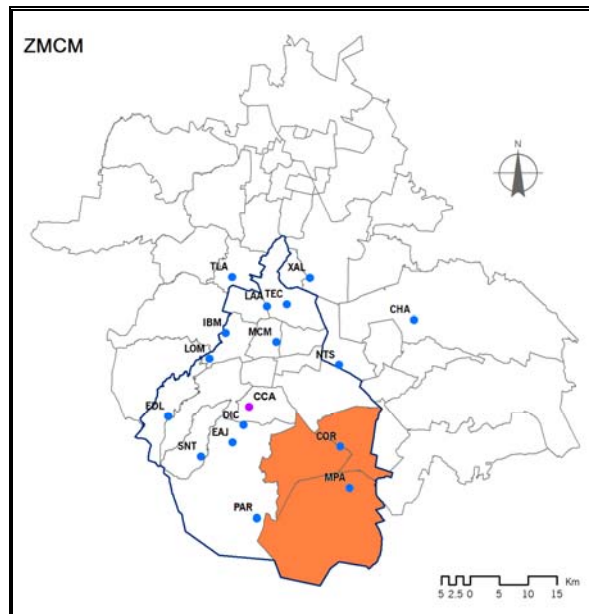
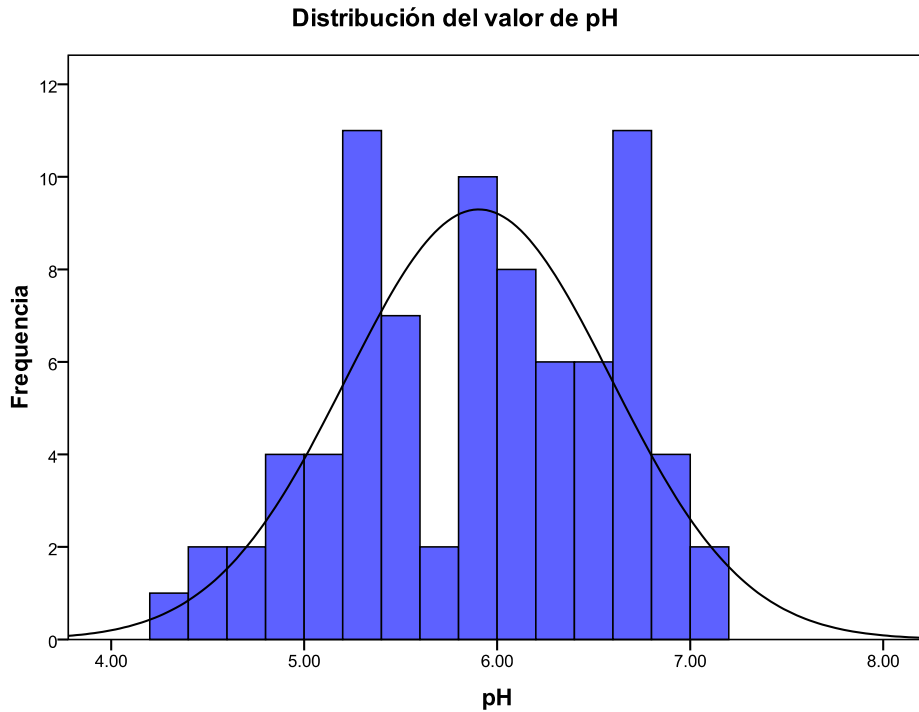


Figura 5.15 Ubicación de las estaciones de monitoreo de la Región Sureste (SE)

Durante la campaña se analizaron 259 muestras, de las cuales, el 26 % presentó valores de  $\text{pH} \leq 5.6$  (Tabla 5.9).

**Tabla 5.9 Número de muestras de depósito húmedo colectadas en la Región Sureste durante la campaña de monitoreo 2003-2009**

ESTACIÓN	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	TOTAL	PH < 5.6	
MPA	21	22	21	20	21	23	23	128	42	32.81%
COR	19	20	18	20	19	20	15	131	26	19.85%
TOTAL								259	68	26.25%



**Figura 5.16 Distribución de los valores de pH ponderado mensual en la región Sureste**

Los valores de pH en la región Sureste están en el intervalo de 4.22 a 7.06, y se registraron dos frecuencias mayoritarias, la primera en el intervalo de 5.2 a 5.4 y la segunda de 6.6 a 6.8 (Figura 5.16). Con respecto al valor ponderado anual y por periodo (Tabla 5.10), la estación MPA presentó el valor menor 3.88, así como más eventos ácidos que la estación COR, siendo los años 2006, 2008 y 2009 los más destacados por el número de eventos ácidos observados (Anexo 2).

Al igual y como ocurrió en las otras regiones, se compararon las medianas de los valores de pH ponderado de las estaciones MPA y COR (5.88 y 5.98 respectivamente). Se aplicó una prueba estadística “T” asumiendo que las variables tenían varianzas iguales. El resultado de la significancia de la prueba fue mayor que 0.05, por lo que no hubo elementos estadísticos suficientes para demostrar diferencias significativas entre las medianas de ambas estaciones.

**Tabla 5.10 Variación del valor de pH ponderado para las estaciones de la Región Sureste (SE)**

CLAVE	MIN	MAX	pH PONDERADO ANUAL							PONDERADO 6 AÑOS
			2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	
COR	5.03	6.57	6.57	6.30	5.59	5.36	5.03	5.57	5.44	5.44
MPA	3.88	6.63	6.63	5.70	5.23	3.88	5.11	5.05	5.37	5.30

Como se puede observar en la Figura 5.17, la estación MPA presenta más eventos ácidos que la estación COR, Los años 2006, 2008 y 2009 destacan por el número de eventos ácidos determinados.

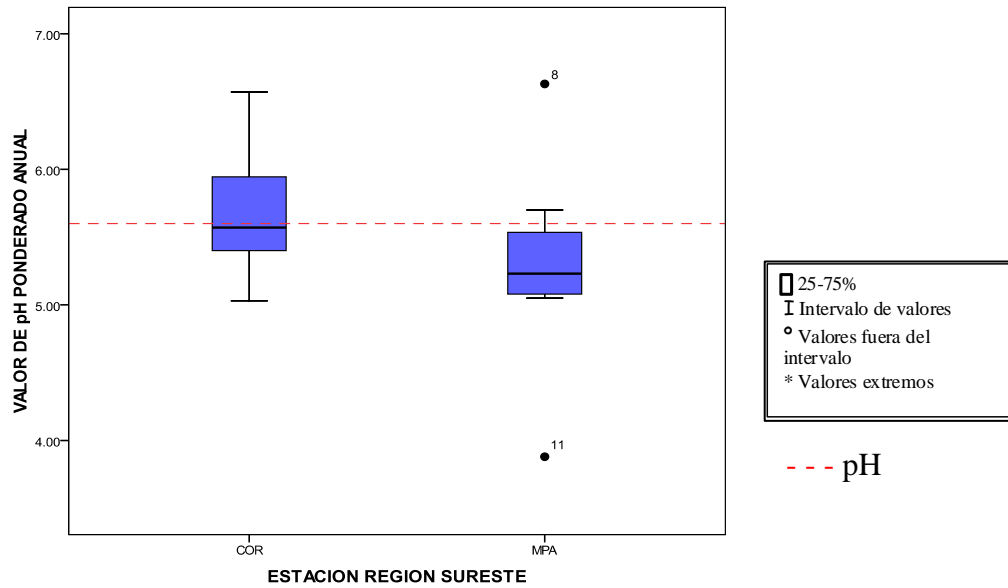


Figura 5.17. Variación del valor de pH ponderado anual para las estaciones de la región Sureste durante la campaña de muestreo 2003-2009

## 5.2 DETERMINACIÓN DE CONDUCTIVIDAD

La conductividad es una medida indirecta de la cantidad de iones en disolución; en la mayoría de las soluciones acuosas, entre mayor sea la cantidad de sales disueltas, mayor resulta su conductividad. Esta determinación analítica, se aplicó para la detección de sólidos disueltos en las muestras colectadas y como parámetro de verificación y control de calidad en la determinación cuantitativa de los constituyentes iónicos, presentes en las muestras de lluvia. Al igual que la determinación de pH, este parámetro se midió en campo y laboratorio.

### 5.2.1 REGIÓN NORESTE (NE)

Para poder comparar los datos, se obtuvo el valor ponderado por mes y por año, de cada estación. La región Noreste presentó valores mínimos de 10.16 y máximos de 155.34 micro Siemens por centímetro ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) (Figura 5.18), cabe mencionar que esta diferencia en los valores de conductividad se debió principalmente a la temporada en que se presentaron estos eventos; aquellos correspondientes al mes de mayo, fueron más altos, debido a los pequeños

volúmenes de lluvia, mientras que, aquellos registrados en el mes de junio y julio resultaron los más bajos, como consecuencia de los altos volúmenes de lluvia y por ende la dilución de iones.

Las estaciones no presentaron la misma desviación estándar (Tabla 5.11 y 5.12), es decir, la distancia promedio de sus valores hacia la media resultó ser diferente, la estación CHA presentó menos variabilidad en los datos, mientras la desviación estándar de XAL fue mayor. Dichas estaciones contrastan en el tipo de región XAL pertenece a una región urbana, industrializada, de alto flujo vehicular, mientras que CHA pertenece a una región de características rurales.

**Tabla 5.11 Valor de mediana de conductividad para la región Noroeste**

ESTACIÓN	MIN	MAX	MEDIANA	DESV. STAND
TEC	15.05	155.34	24.68	23.52
NTS	10.16	106.93	22.20	17.41
CHA	10.31	57.70	18.46	9.96
XAL	11.6	89.4	14.95	25.53

**Tabla 5.12 Valor de conductividad ponderada anual para muestras colectadas en la región Noreste**

ESTACIÓN	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
TEC	26.04	33.18	25.27	26.89	19.75	22.32	23.56
NTS	22.39	27.59	23.38	23.04	19.09	20.92	23.30
CHA	34.09	23.42	20.44	20.04	15.12	21.33	15.59
XAL	23.26	23.20	24.05	25.58	23.60	23.90	22.23

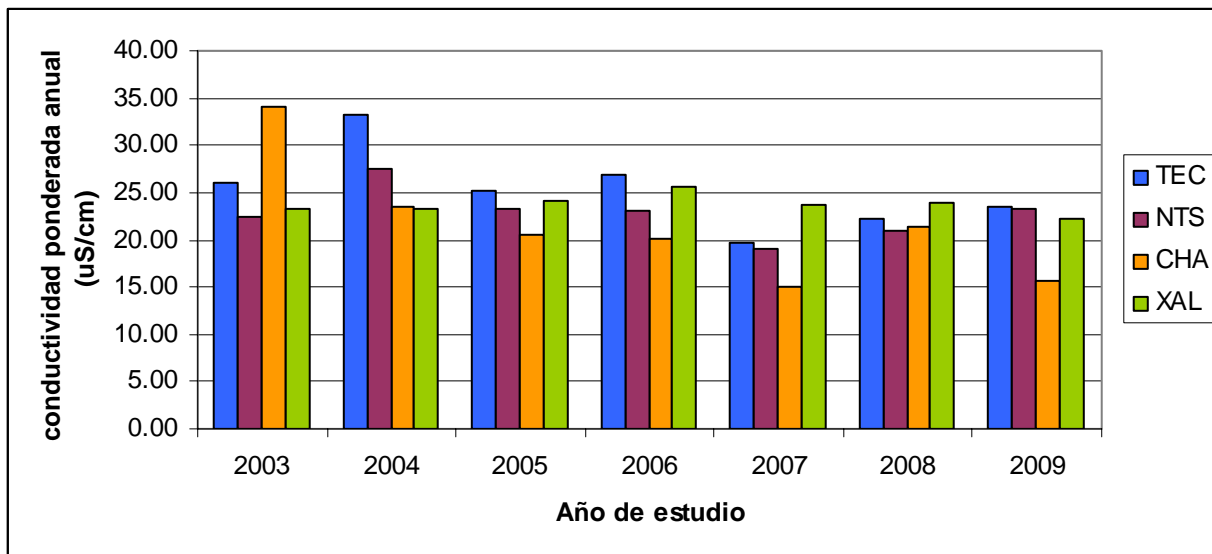


Figura 5.18 Valores de conductividad ponderada anual en la región Noreste (NE)

### 5.2.2 REGIÓN NOROESTE (NO)

El valor de conductividad en la región Noroeste se encontró dentro del intervalo de 7.91 a 122.72 $\mu$ S/cm, Los valores mayores a 100  $\mu$ S correspondieron a eventos de lluvia con volúmenes de precipitación menores a 5 mm, lo que indica una mayor concentración de sólidos disueltos en estas muestras. Estos eventos se presentaron durante el mes de mayo, dentro de lo que se considera periodo de secas (Tabla 5.13).

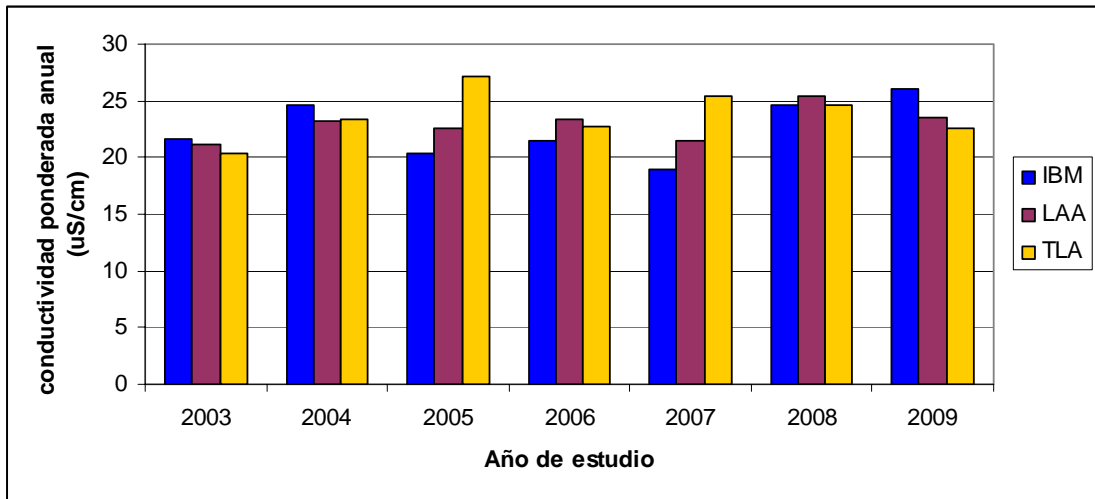
Tabla 5.13 Valor de mediana de conductividad para la Región Noroeste

ESTACIÓN	MIN	MAX	MEDIANA	DESV. STAND
IBM	14.08	122.72	23.87	17.46
LAA	7.91	12.12	22.65	12.12
TLA	13.95	23.81	23.43	23.81

Con respecto a los valores de conductividad ponderada por año, se observa que, no existe diferencia significativa entre estos valores. La conductividad se ha mantenido en un intervalo de 20 a 25  $\mu$ S/cm (Tabla 5.14, Figura 5.19).

**Tabla 5.14 Valor de conductividad ponderada anual para muestras colectadas en la región Noreste**

ESTACIÓN	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
IBM	21.69	24.65	20.42	21.48	18.97	24.68	26.01
LAA	21.16	23.18	22.59	23.41	21.44	25.37	23.55
TLA	20.30	23.39	27.20	22.73	25.47	24.64	22.54



**Figura 5.19 Valores de conductividad ponderada anual en la Región Noroeste (NO)**

### 5.2.3 REGIÓN CENTRO

La estación del Museo de la Ciudad de México presentó una media de 26.34  $\mu\text{S}$  y mediana de 23.87  $\mu\text{S}$  (Tablas 5.15 y 5.16). Se observaron valores fuera del intervalo y valores extremos que correspondieron a eventos con poco volumen de lluvia. Debido a que dichos valores exceden el valor de 100  $\mu\text{S}$ , se decidió eliminarlos de la base de datos debido a que, por arriba de dicho valor se considera como indicador de contaminación por manipulación o por polvos (Figura 5.20)

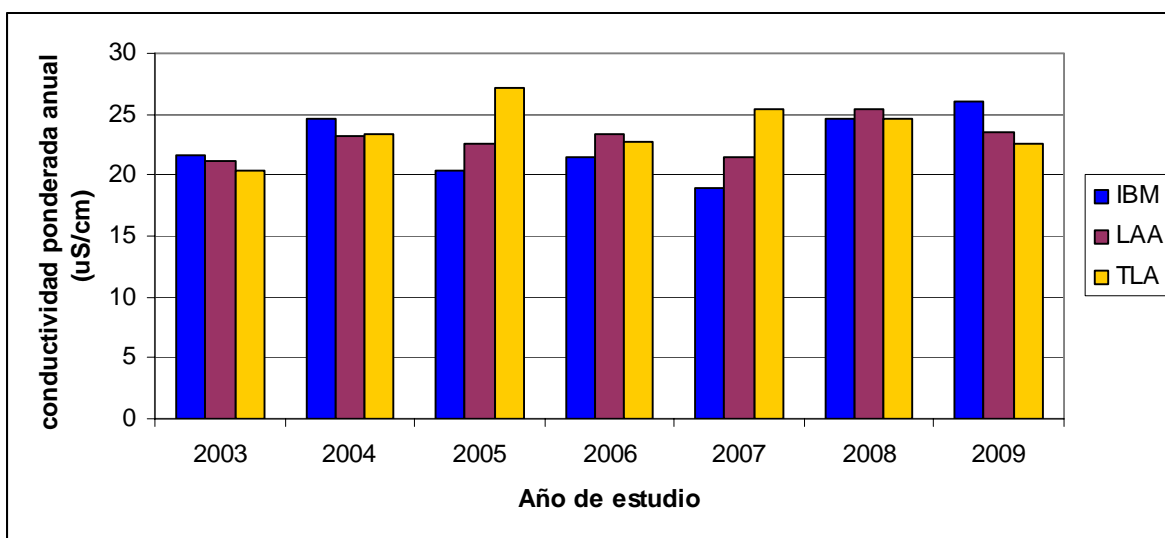


**Tabla 5.15 Valor de Mediana de conductividad para la Región Centro**

ESTACIÓN	MIN	MAX	MEDIANA	DESV. STAND
MCM	10.13	89.83	23.87	18.33

**Tabla 5.16 Valor de conductividad ponderada anual para muestras colectadas en la región Noreste**

ESTACIÓN	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
MCM	24.60	25.37	22.48	23.01	24.65	26.43	23.55



**Figura 5.20 Valores de conductividad ponderada anual en la región Centro**

#### 5.2.4 REGIÓN SUROESTE

La región Suroeste tuvo una mediana de 22  $\mu\text{S/cm}$ , con valores mínimos y máximos de 3.10 y 115.7  $\mu\text{S/cm}$  respectivamente, siendo la estación Lomas (LOM), la que mostró mayor variación en esta determinación, mientras que, las estaciones Ecoguardas Desierto de los Leones (EDL ) y San Nicolás Totolapan (SNT) presentaron una mayor homogeneidad entre sus valores de conductividad (Tabla 5.17-5.18 y Figura 5.21).

La estación Ecoguardas Desierto de los Leones y San Nicolás Totolapan presentaron menor desviación estándar. Estas estaciones, se distinguieron por registrar los mayores volúmenes de precipitación mensual.

**Tabla 5.17 Valor de conductividad ponderada para la región Suroeste**

ESTACIÓN	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
DIC	22.64	22.54	20.09	24.26	19.00	24.15	22.80
EAJ	20.62	21.30	15.82	19.30	14.60	21.75	23.52
EDL	16.31	17.77	16.29	15.81	15.86	17.68	17.36
LOM	22.05	24.06	17.52	18.58	16.24	35.05	25.25
PAR	15.36	16.74	19.89	19.10	24.90	19.57	17.60
SNT	19.22	20.47	19.36	18.68	22.70	20.05	18.97
CU-CCA	25.43	22.07	28.24	24.24	24.80	27.56	25.65

**Tabla 5.18 Valor de mediana de conductividad para la región Suroeste**

ESTACIÓN	MIN	MAX	MEDIANA	DESV. STAND
DIC	3.10	88.43	22.14	13.94
EAJ	9.25	61.78	21.11	10.55
EDL	7.23	51.61	16.87	8.89
LOM	6.33	115.7	22.51	22.43
PAR	7.95	48.86	17.93	10.29
SNT	11.33	48.21	20.87	8.20
CU-CCA	11.46	50.18	21.44	10.13

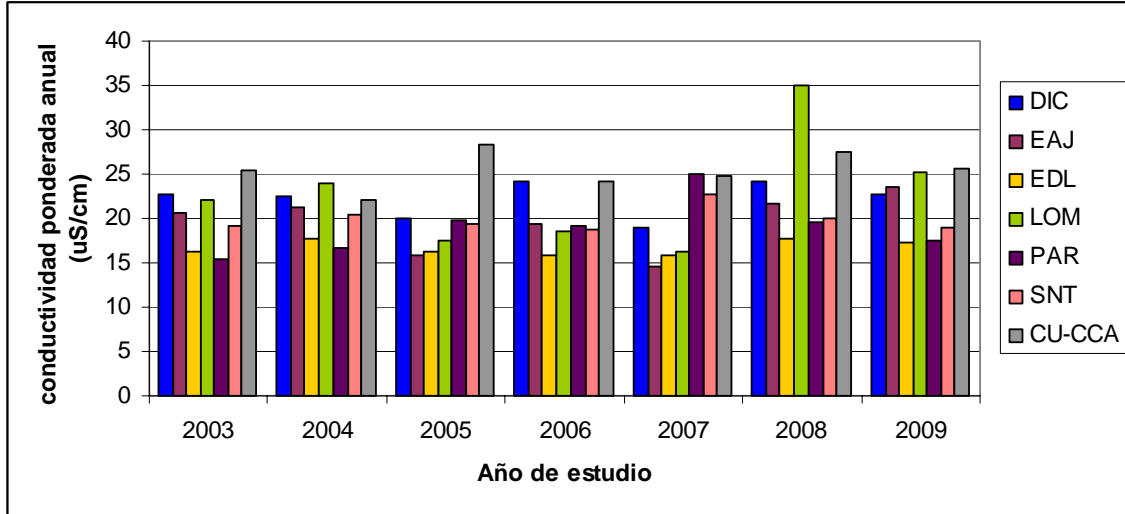


Figura 5.21 Valores de conductividad ponderada anual en la región Suroeste

### 5.2.5 REGIÓN SURESTE

La región Sureste (SE), registró la misma mediana de conductividad para las estas estaciones ubicadas en ella (20  $\mu$ S/cm) y la misma desviación estándar, sin embargo, estas estaciones presentaron diferencias en sus ponderados anuales; menores los valores de MPA con respecto a COR los primeros años (2003-2005), mayores los dos años subsiguientes, y para 2008-2009 ambas estaciones presentaron valores iguales (Tabla 5.19, 5.20, Figura 5.22).

Tabla 5.19 Valor de mediana de conductividad para la Región Sureste

ESTACIÓN	MIN	MAX	MEDIANA	DESV. STAND
COR	10.61	92.8	20.01	11.59
MPA	8.18	61.15	20.06	11.34

Tabla 5.20 Valor de mediana de conductividad para la Región Sureste

ESTACIÓN	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
COR	19.99	20.00	19.66	18.71	21.66	23.38	21.66
MPA	18.56	17.99	17.38	20.46	23.45	23.83	21.33

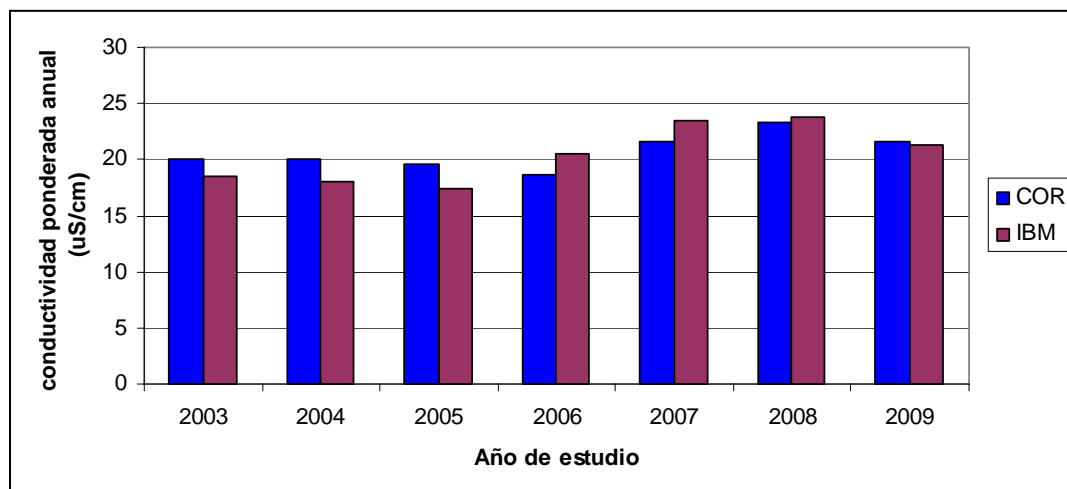


Figura 5.22 Valores de conductividad ponderada anual en la Región Sureste

### 5.3 ANÁLISIS DE ANIONES Y CATIONES

La importancia de cuantificar los principales iones presentes en la lluvia, estriba en su utilidad para determinar la relación entre la lluvia ácida y la formación de sus precursores ( $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_2$ ) a partir de la cuantificación de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  presentes en las muestras de lluvia. A partir de los analitos cuantificados se calculó un Balance Iónico (BI), que permitió establecer un adecuado control de calidad para la identificación y cuantificación los iones presentes en cada evento de lluvia.

#### 5.3.1 DETERMINACIÓN DE ANIONES: SULFATO, NITRATO Y CLORURO

A través de la especiación iónica de los compuestos disueltos en el depósito húmedo, se puede obtener información importante sobre los procesos de transformación y transporte que ocurren en la atmósfera. A continuación se describen los principales aniones presentes en las muestras de lluvia:

### 5.3.1.1 Ion sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ )

El anión más abundante en las muestras de depósito húmedo fue el ión sulfato, el cual representó alrededor del 35 al 40% de la concentración relativa de los aniones determinados, en las muestras colectadas en las regiones Noroeste, Noreste y del 50 al 60% en las regiones Sureste, Suroeste y Centro (Figura 5.23), seguido de los iones bicarbonato/carbonato, nitrato y cloruro.

La prevalencia del ión sulfato es interesante porque existen varias fuentes de emisión de  $\text{SO}_4^{2-}$  alrededor de la ZMCM, entre las que se tienen: contaminación vehicular, emisiones del volcán Popocatepetl, las centrales eléctricas, termoeléctricas y la refinería de Tula, Hidalgo.

Las muestras de depósito húmedo colectadas en la región Noreste y Noroeste, presentaron la mayor concentración de ión  $\text{SO}_4^{2-}$  disuelto, cuya mediana fue  $72 \mu\text{Eq/L}$ , con un máximo ponderado mensual de  $620 \mu\text{Eq/L}$ , en el mes de mayo del año 2008 (Tabla 5.21 y Figura 5.24), mientras que la región Suroeste presentó la menor concentración de éste ión, con  $7.68 \mu\text{Eq/L}$  en la estación CU, en plena temporada de lluvias.

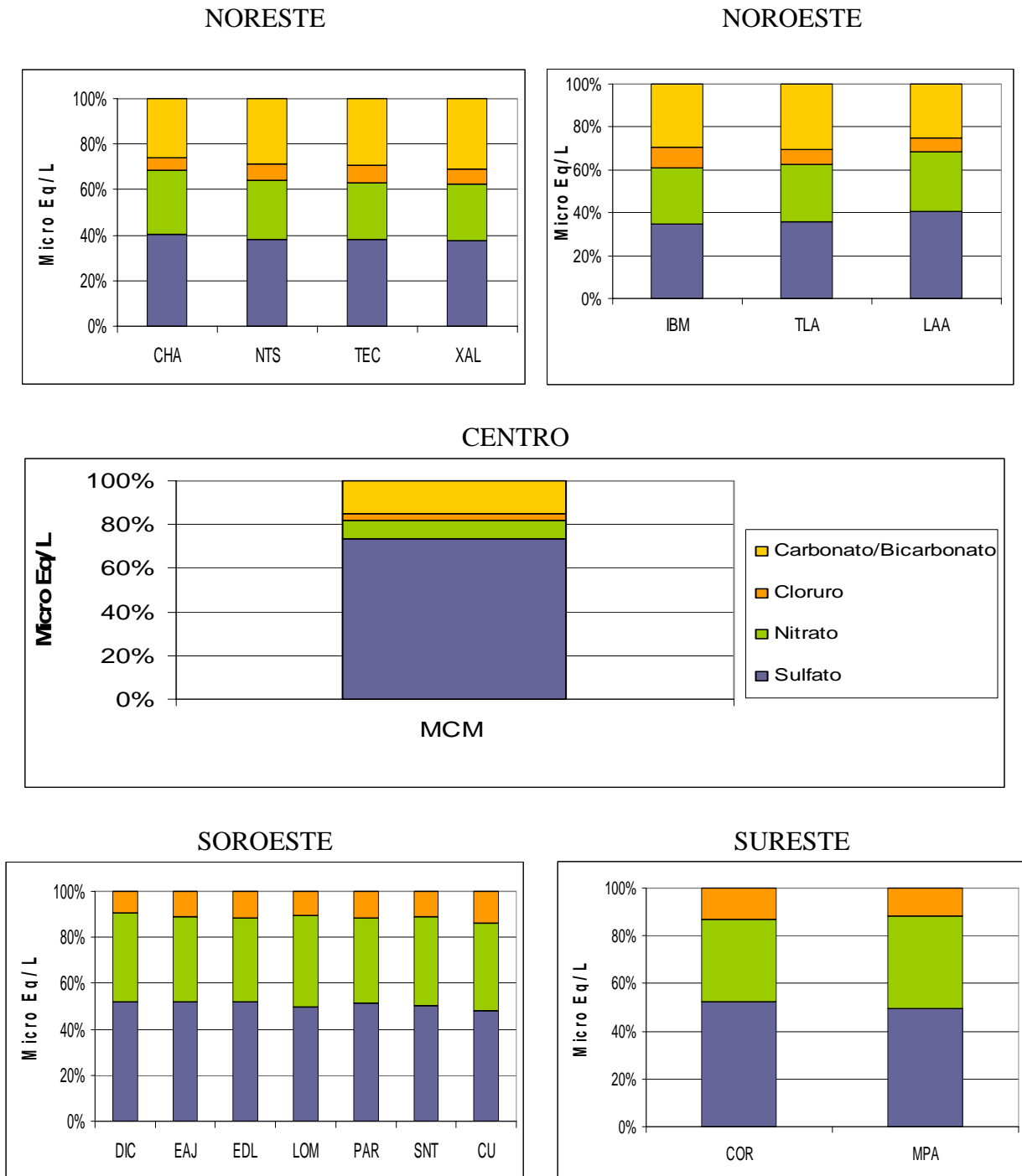
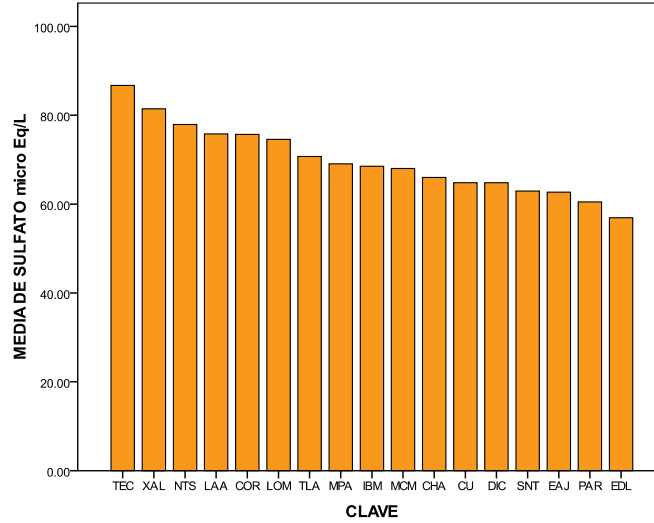


Figura 5.23 Abundancia relativa de aniones en muestras de depósito húmedo

**Tabla 5.21 Concentración de ión sulfato en muestras de lluvia  
colectadas durante el periodo 2003-2009**

Ión sulfato $\mu\text{Eq/L}$			
CLAVE	MEDIA	MÍNIMO	MÁXIMO
CHA	66.02	18.38	213.19
NTS	77.92	17.50	387.00
TEC	86.71	18.40	620.70
XAL	81.44	17.50	232.30
IBM	68.51	23.40	131.11
LAA	75.81	10.50	209.30
TLA	70.71	21.10	160.80
MCM	68.01	17.50	184.20
COR	75.70	16.08	307.90
MPA	69.05	17.50	325.60
DIC	64.80	26.30	158.70
EAJ	62.68	22.33	152.00
EDL	56.93	21.00	131.99
LOM	74.57	20.90	142.70
PAR	60.48	16.30	164.40
SNT	62.95	11.50	147.20
CU-CCA	64.82	7.68	228.38

Se graficó la media de la concentración de sulfato, determinado en las muestras de lluvia (Figura 5.24), y se observó que las estaciones que se encuentran en la región Norte de la ZMCM, presentan valores mayores, que aquellas estaciones que se encuentran en la región Sur, cuya diferencia fue alrededor de 20  $\mu\text{Eq/L}$ . Excepto la estación Chapingo (CHA), cuya mediana se encuentra en el mismo intervalo que la estación CU-CCA.



**Figura 5.24 Valor de media del ión sulfato ( $\mu\text{Eq/L}$ ) en muestras de lluvia colectadas durante el periodo 2003-2009**

Al ponderar la concentración con respecto a su volumen de lluvia, y tomando en cuenta el área de la cubeta donde se realizó la colección de muestras, se observó la distribución del ión  $\text{SO}_4^{2-}$  en Kg /ha por mes; las estaciones con mayor distribución se localizaron dentro de la región Suroeste. La estación Chapingo (CHA), que fue seleccionada como estación para medir la concentración de fondo, presentó la menor distribución de este ión durante todo el periodo de muestreo.

Lo anterior se explica como consecuencia del transporte eólico de los precursores, que alcalinizan los eventos de lluvia y por ende originó menor afectación por el fenómeno de la lluvia ácida a la zona Norte (Figura 5.25).

El comportamiento de la acidez del agua de lluvia se asocia con la cantidad de sulfatos y nitratos disueltos en ella. En la Figura 5.26 se observa un incremento gradual en el depósito de sulfatos, a partir de 2005. El máximo se alcanzó en 2007 en la estación Lomas (LOM) con 52.10 Kg/ha y a partir de 2008 se presentó una disminución en su concentración.



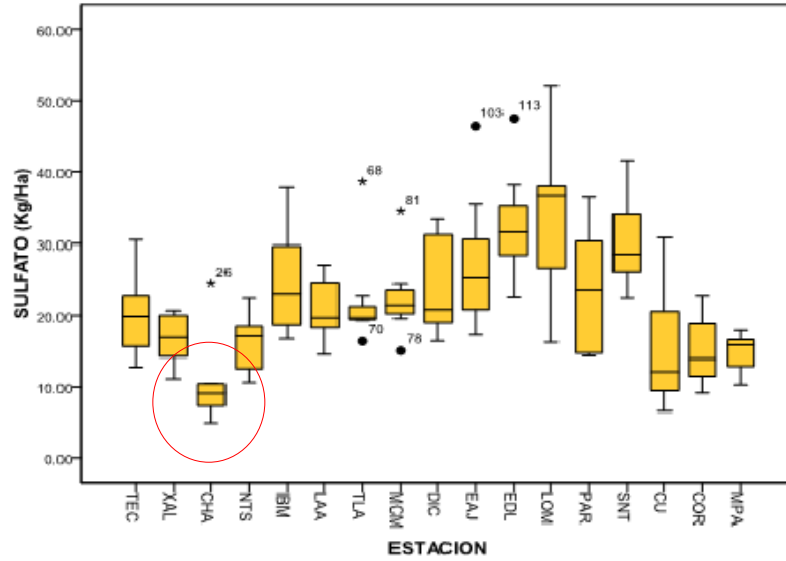


Figura 5.25 Distribución del ion sulfato en muestras de lluvia colectadas durante el periodo 2003-2009

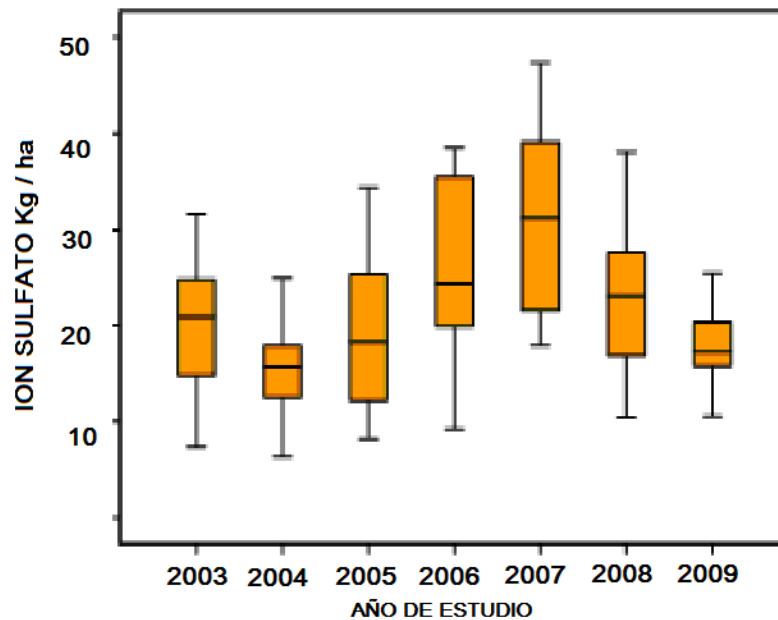


Figura 5.26 Variación anual del ión sulfato en Kg / ha

### 5.3.1.2 ION NITRATO ( $\text{NO}_3^-$ )

Con respecto a la determinación del ión Nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), la Tabla 5.22 y la Figura 5.27 muestran los valores de media mensual ( $\approx 50 \mu\text{Eq/L}$ ), lo que equivale a  $\approx 2.79 \text{ ppm}$ ; este valor está por debajo de las concentraciones determinadas para  $\text{SO}_4^{2-}$ . Durante el estudio, la estación TEC también presentó el valor máximo registrado ( $620.70 \mu\text{Eq/L}$ ) para nitratos, en la misma magnitud que el ion sulfato.

De acuerdo a su abundancia relativa, el ión nitrato representó alrededor del 20 y 30% de los aniones determinados, excepto para la región Centro, donde constituyó el 10% del total.

Como se observa en la Figura 5.27 los valores de la media de concentración de  $\text{NO}_3^-$  fueron similares en casi todas las estaciones. Lo anterior se verificó mediante la aplicación de una prueba de igualdad de medias, la cual demostró que no existe diferencia significativas entre algunas estaciones, excepto para las medias correspondientes a las estaciones TEC, NTS y CHA.

Por otra parte, el cálculo de la distribución de ión  $\text{NO}_3^-$  en Kg/Ha, demostró mayor tasa de deposición en las estaciones LOM, EDL, SNT, e IBM, ubicadas en la región suroeste y noroeste respectivamente.

Las estaciones de la región Suroeste, se encuentran ubicadas en suelo de conservación, donde el suelo es rico en materia orgánica y por lo tanto pueden llevarse a cabo reacciones de nitrificación, lo que explica la concentración de ión nitrato y la acidez de las muestras.

Cabe mencionar, el máximo obtenido en la estación Cerro del Tepeyac (TEC), la cual es una zona habitacional con gran actividad comercial, por lo que se considera que las altas concentraciones de nitrato posiblemente son debidas a la quema de fuegos pirotécnicos usados en las festividades de la región, cuya base es el nitrato de amonio.

**Tabla 5.22 Concentración de ión nitrato en muestras de lluvia  
colectadas durante el periodo de 2003-2009**

ión nitrato $\mu\text{Eq/L}$			
CLAVE	MEDIA	MINIMO	MAXIMO
CHA	66.02	18.38	213.19
NTS	66.53	17.50	147.80
TEC	86.11	18.40	620.70
XAL	51.12	10.90	144.00
IBM	50.88	17.40	110.50
LAA	52.81	10.50	194.60
TLA	51.78	11.10	158.30
MCM	45.85	5.20	132.70
DIC	49.91	18.80	129.80
EAJ	46.74	14.90	115.40
EDL	40.72	10.80	121.40
LOM	52.70	14.40	145.50
PAR	47.50	9.10	183.30
SNT	53.21	18.40	172.10
CU	46.84	1.14	130.12
COR	52.71	7.60	228.80
MPA	48.31	14.30	155.00

Al graficar los valores de mediana de la concentración de ión nitrato, se observó una diferencia de hasta 40  $\mu\text{Eq/L}$ , entre las muestras colectadas en la región Norte y Sur

(Figura 5.28). Siendo las estaciones IBM y LOM, aquellas que presentan mayor variabilidad en las concentraciones obtenidas.

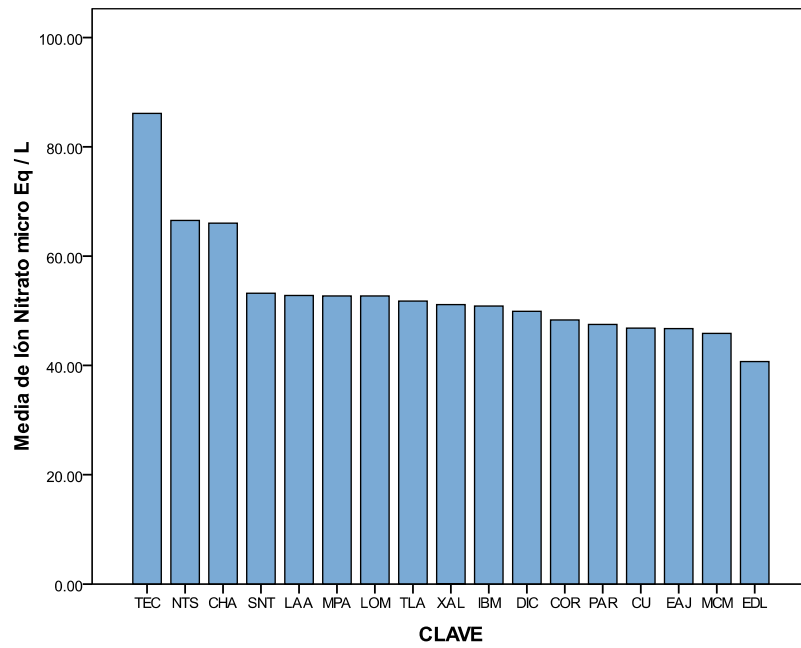


Figura 5.27 Valor media de ión nitrato ( $\mu\text{Eq/L}$ ) en muestras de lluvia colectadas durante el periodo 2003-2009

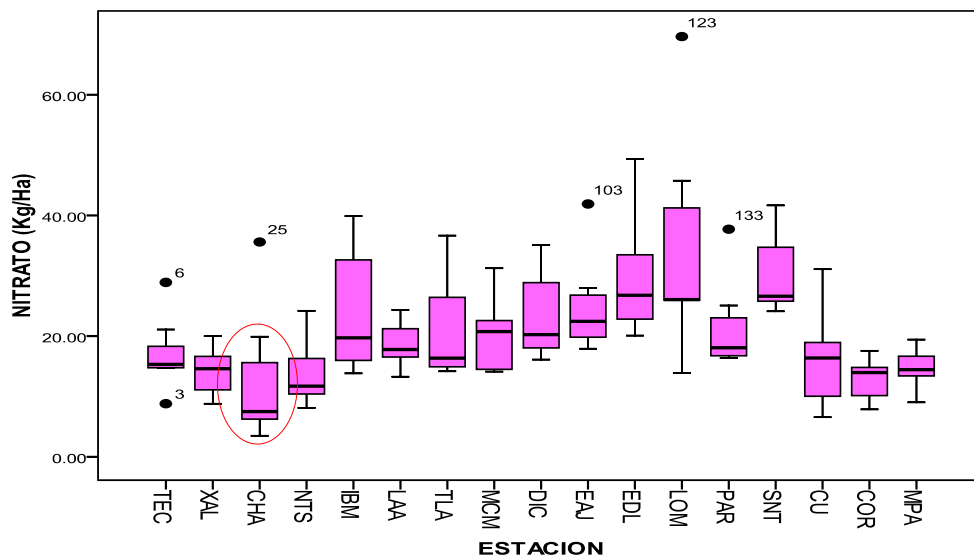
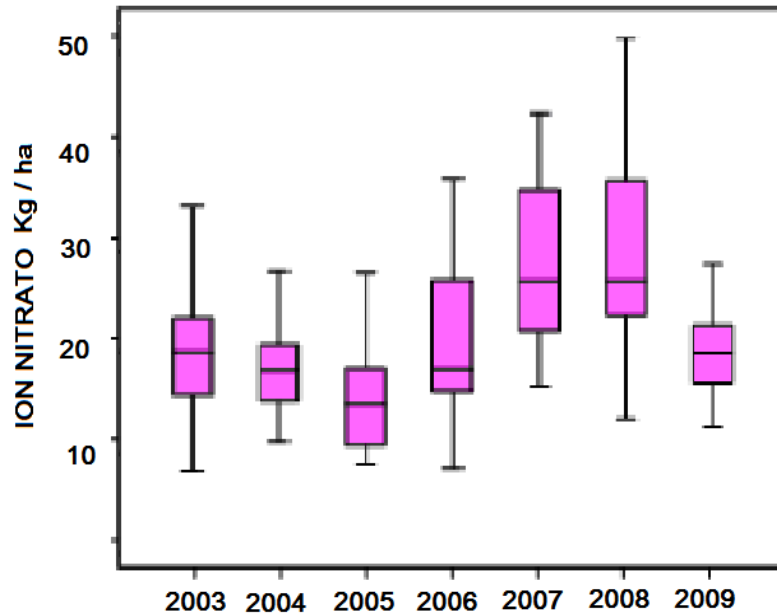


Figura 5.28 Distribución del ión nitrato por estación en muestras de depósito húmedo colectadas durante el periodo 2003-2009



**Figura 5.29 Distribución anual en Kg/ha del ión nitrato en muestras de lluvia colectadas durante el periodo 2003-2009**

Con respecto a la distribución en Kg/ha del ión nitrato, la Figura 5.29 muestra una media mensual de 24 Kg/ha, Siendo la estación CHA quien presentó la menor concentración de este parámetro, mientras que, la estación LOM mostró los valores más elevados durante 2007 (69.6 Kg/ha).

### 5.3.1.3 ION CLORURO (Cl<sup>-</sup>)

Con respecto a la determinación del ión Cloruro (Cl<sup>-</sup>), éste se encontró por debajo de las concentraciones de sulfato y nitrato. Mostró una media mensual de 12.7 µEq/L, lo que correspondió a 0.44 ppm (Tabla 5.23).

La distribución mensual de este ión se encontró en 0.37 Kg/ha, siguiendo el mismo comportamiento que los iones sulfato y nitrato (Figura 5.30). La estación con menor concentración fue CHA, mientras que la distribución mensual más elevada se registró en la estación TEC. La aplicación de una prueba estadística para la comparación de medias, demostró la existencia de diferencias significativas entre CHA y el resto de las estaciones.

**Tabla 5.23 Concentración de ion cloruro en muestras de lluvia  
colectadas durante el periodo 2003-2009**

ion cloruro $\mu\text{Eq/L}$			
CLAVE	MEDIA	MÍNIMO	MÁXIMO
CHA	43.91	7.80	165.40
NTS	52.12	7.90	264.30
TEC	57.59	15.26	337.90
XAL	14.56	0.50	45.20
IBM	16.38	0.10	151.39
LAA	11.55	0.40	39.48
TLA	13.65	1.60	46.26
MCM	13.89	0.28	70.15
COR	17.78	1.25	134.20
MPA	14.98	0.30	60.29
DIC	11.15	0.31	31.92
EAJ	13.73	2.40	64.01
EDL	13.85	0.14	98.00
LOM	11.62	0.20	34.71
PAR	13.34	0.00	57.00
SNT	13.49	0.00	83.20
CU-CCA	16.95	1.05	80.75

Al graficar los valores de la media de la concentración de ión cloruro, se observó una diferencia mayor a  $35 \mu\text{Eq/L}$ , entre los eventos registrados en la región Norte y la región Sur.

Las estaciones CHA, LAA y LOM presentaron los valores más bajos (Figura 5.31), mientras que las estaciones EDL, SNT, LOM e IBM, presentaron mayor variabilidad con respecto a la concentración del ión cloruro.

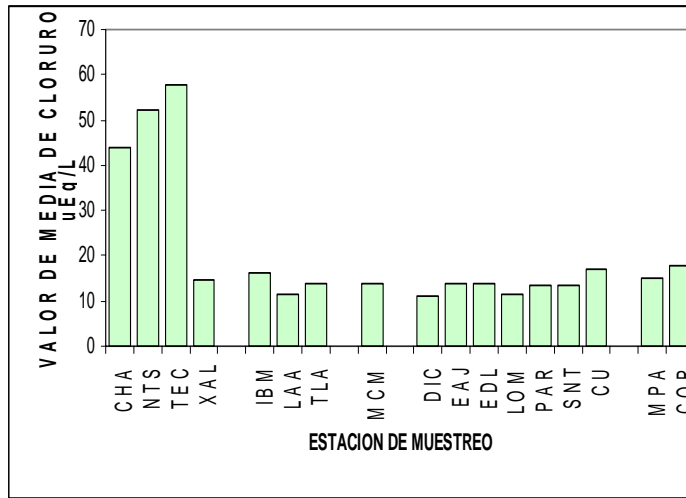


Figura 5.30 Valor de media de ión Cloruro determinado en muestras de depósito húmedo colectadas en el periodo 2003 – 2009

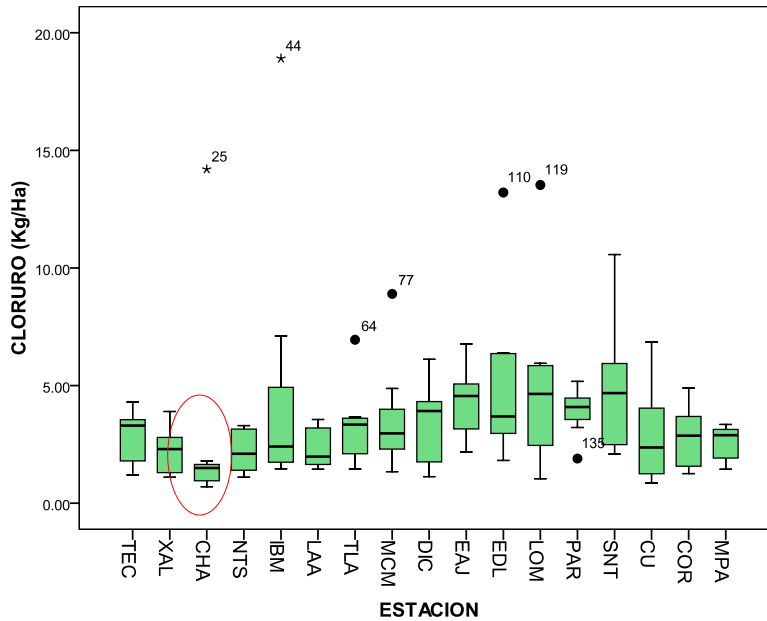


Figura 5.31 Distribución del ion Cloruro en Kg/ha en muestras de depósito húmedo colectadas durante el periodo de 2003-2009

### 5.3.2 DETERMINACION DE CATIONES

Con el fin de establecer los balances iónicos en las muestras de lluvia, se determinaron los cationes  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$ . Los resultados correspondientes a cada ión se reportan en el Anexo 1, debido a la amplitud de los datos, sólo se muestran los valores mínimo, máximo y media de cada catión (Tabla 5.24), así como los factores de correlación que permiten determinar la relación entre aniones y cationes.

De acuerdo a su abundancia relativa, el ion amonio representó entre un 50 y 60 % de los cationes determinados, seguido del ion calcio que representó el 20% y por ultimo los iones magnesio, potasio e hidronio (Figura 5.32). Con respecto al ion hidronio, su concentración relativa se incrementó de norte a sur, siendo las estaciones de la región Suroeste las que contienen hasta el 30 % de su contribución.

**Tabla 5.24 Determinación de cationes en muestras de depósito húmedo de la Región Noreste**

CLAVE		SODIO	AMONIO	POTASIO	MAGNESIO	CALCIO
CHA	Media	5.61	90.16	3.91	10.25	37.85
	Mínimo	LD	22.80	LD	LD	3.00
	Máximo	22.60	192.80	19.56	50.10	139.50
NTS	Media	7.26	89.88	3.68	12.43	42.46
	Mínimo	LD	28.79	029	080	5.15
	Máximo	40.25	182.50	17.06	58.36	121.60
TEC	Media	13.44	88.22	3.63	15.06	59.51
	Mínimo	LD	11.00	LD	080	15.00
	Máximo	221.10	179.40	12.26	75.19	231.00
XAL	Media	5.82	91.98	3.39	12.96	58.62
	Mínimo	LD	54.50	050	1.50	14.00
	Máximo	19.50	153.33	8.81	76.31	119.90
Total	Media	8.07	90.05	3.65	12.69	49.68
	Mínimo	LD	11.00	LD	LD	3.00
	Máximo	221.10	192.80	19.56	76.31	231.00

LD= Límite de detección (0.05, 0.04, 0.05, 0.05 y 0.06 para  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$  respectivamente)



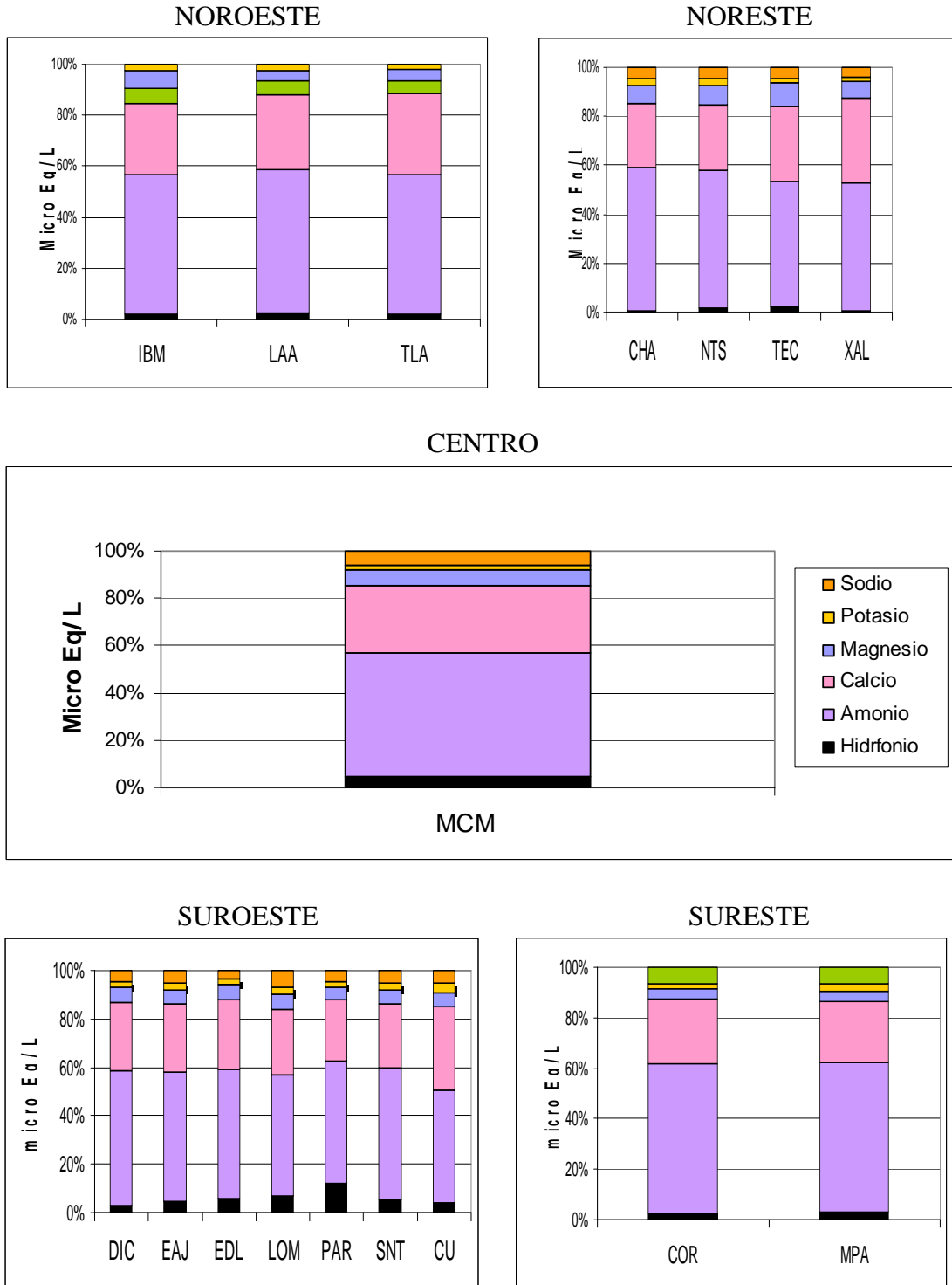


Fig. 5.32 Abundancia relativa de cationes determinados en muestras de depósito húmedo

## 5.4 COMPONENTES PRINCIPALES

Esta técnica fue inicialmente desarrollada por Pearson a finales del siglo XIX y posteriormente optimizada por Hotelling en los años 30 del siglo XX y se diseñó para estudiar las relaciones que se presentan entre  $p$  variables correlacionadas (que miden información común).

Uno de los objetivos del cálculo de componentes principales es la identificación de los mismos, es decir, averiguar qué variables proporcionan en resumen, la información total.

Al transformar el conjunto original de variables en otro conjunto de nuevas variables correlacionadas entre sí (que no tenga repetición o redundancia en la información) se obtiene un conjunto de componentes principales. Las nuevas variables son combinaciones lineales de las anteriores y se van construyendo según el orden de importancia en cuanto a la variabilidad total que recogen de la muestra. De modo ideal, se buscan  $m < p$  variables que sean combinaciones lineales de las  $p$  originales y que estén correlacionadas, recogiendo la mayor parte de la información o variabilidad de los datos.

Habitualmente, se conservan sólo aquellos componentes que recogen la mayor parte de la variabilidad, hecho que permite representar los datos según dos o tres dimensiones si se conservan dos o tres ejes factoriales, pudiéndose identificar entonces grupos naturales entre las observaciones.

Para realizar el análisis de componentes principales, se dispuso de los siguientes datos:

- 10 parámetros químicos del análisis del depósito húmedo: conductividad eléctrica, pH y las concentraciones ( $\mu\text{Eq/L}$ ) de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , así como su volumen de precipitación y el año de muestreo.
- 16 estaciones de muestreo, 20 ó 21 observaciones por año, en un periodo de 7 años.
- Adicionalmente, se trabajó con una estación monitoreada en Ciudad Universitaria en el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CU-CCA), donde la colección de muestra se realizó por día, obteniéndose un total de 333 muestras en un periodo de 7 años.

Para el desarrollo del Análisis de Componentes Principales (ACP) se trabajaron los datos por región: Noreste, Noroeste, centro, Sureste y Suroeste.

Los resultados generales en el Análisis de Componentes Principales, muestran tres ejes o componentes principales, la porción de la varianza total explicada por cada componente es:

1 ° eje: 48.73%

2 ° eje: 13.71%

3 ° eje: 9.45%

Por lo que, los tres primeros componentes principales explican el 72% de la varianza (o inercia) de la dispersión total. La Figura 5.33 muestra las representaciones de las variables y sus correlaciones para cada posición en los ejes I-II, II-III

La Figura 5.34, representa a casi todas las variables en un grupo a excepción del ión  $H^+$  que se encuentra en oposición al eje del componente 2.

En el eje del componente 1 se distinguen dos grupos, el principal conformado por los iones mayoritarios ( $SO_4^{2-}$  y  $NO_3^-$ ) y sus contra-iones ( $Ca^{2+}$  y  $NH_4^+$ ). Este grupo establece la conductividad de las muestras. El segundo grupo, integrado por los iones  $K^+$ ,  $Cl^-$ ,  $Na^+$  y  $Mg^{2+}$  confirma la aportación de aerosoles de origen marino en las muestras.

De acuerdo a la Figura 5.35, las mayores concentraciones de  $SO_4^{2-}$  y  $NO_3^-$  se han determinado en las estaciones Cerro del Tepeyac (TEC), Nezahualcoyotl Sur (NTS), Ecoguardas Ajusco (EAJ), Xalostoc ( XAL), Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA) y Corena (COR).

En el eje del segundo componente, se observa que el pH y la alcalinidad están directamente asociados con la región de muestreo (Norte, Centro o Sur) de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. De acuerdo a la Figura 18, las estaciones más ácidas son Parres (PAR), San Nicolás Totaalpan (SNT) y Lomas(LOM) de la región Suroeste.

Con respecto al componente 3, se observa una fuerte correlación entre el  $Cl^-$ ,  $K^+$  y  $HCO_3^-$ ; dicha relación sugiere su procedencia de compuestos como el formiato de potasio ( $KHCO_2$ ), una sal común en el uso de fertilizantes y el perclorato de potasio ( $KClO_4$ ) un

oxidante común usado en fuegos artificiales, municiones, cápsulas fulminantes, explosivos primarios, etc.

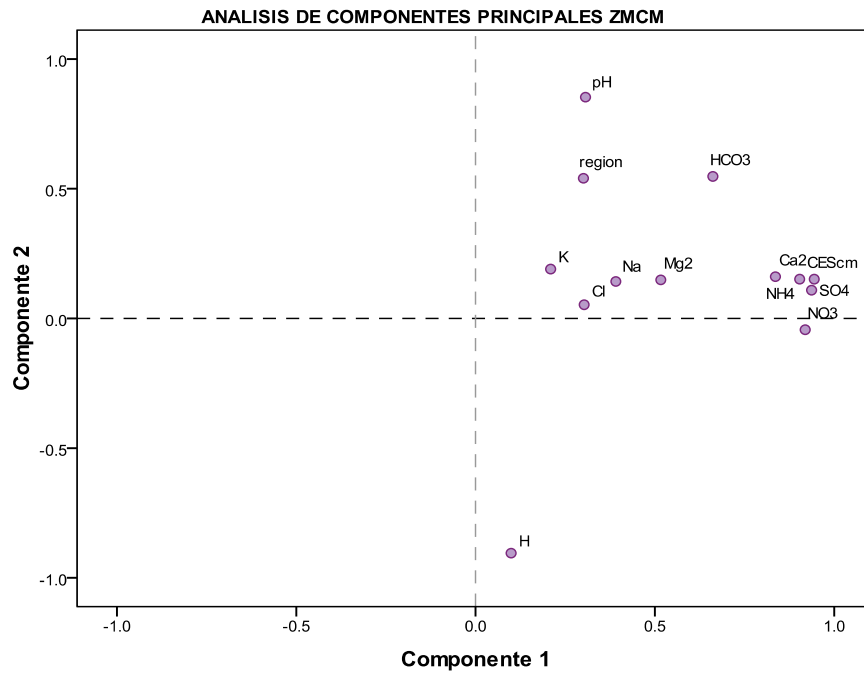


Figura 5.33 Correlación Componentes I y II

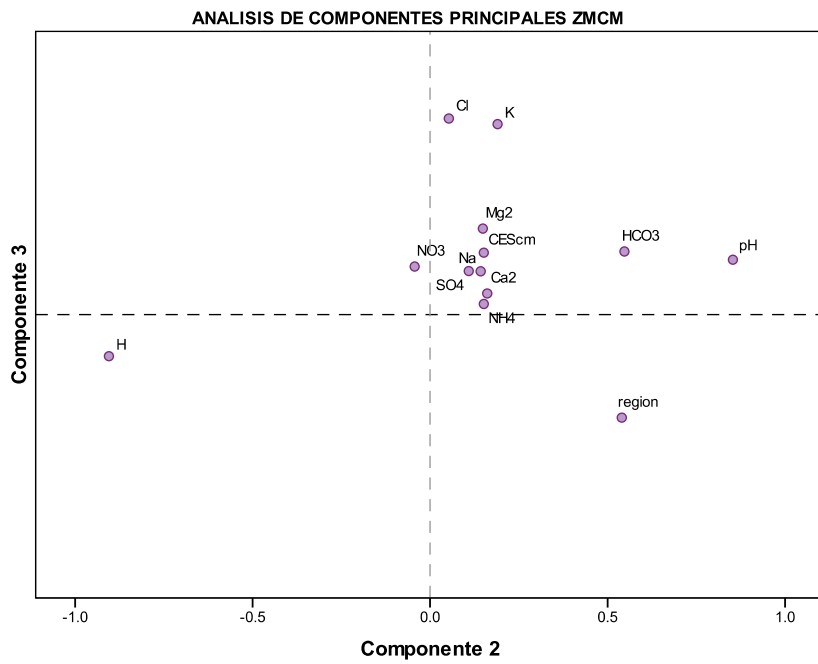


Figura 5.34 Correlación Componentes II y III

ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES ZMCM

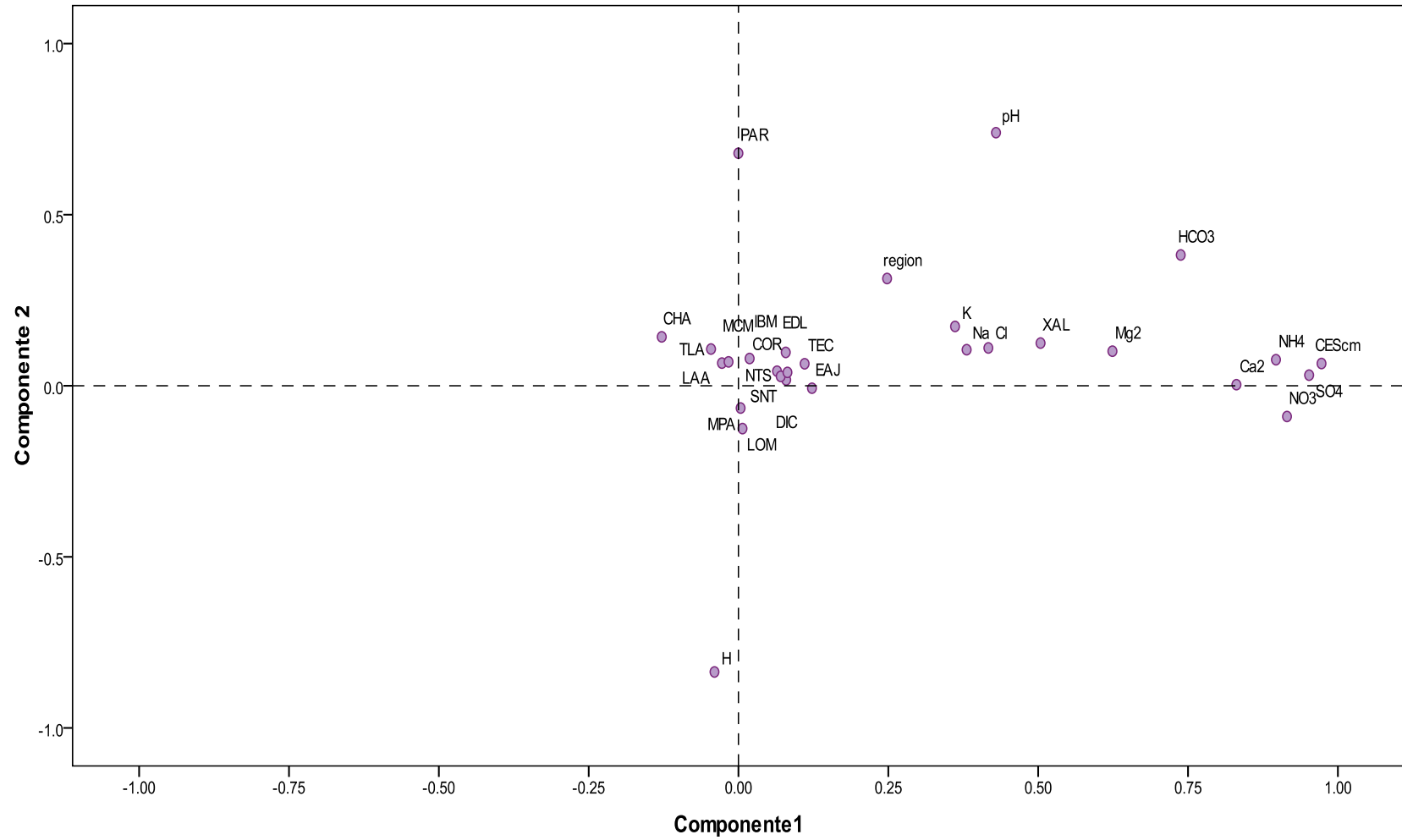


Figura 5.35 Correlación Componentes I y II con estaciones de muestreo

## 5.5 ASOCIACIONES IÓNICAS

Para identificar las asociaciones iónicas entre las especies determinadas en las muestras de deposición húmeda, se usó una correlación lineal mediante el coeficiente rho de Spearman (Tablas 5.23-5.27), para posteriormente asociar los solutos con su posible origen:

- **Ácido** Una combinación de  $H^+$ ,  $SO_4^{2-}$  y  $NO_3^-$ , procedentes de la combustión de energéticos fósiles.
- **Marino** Cuando predomina la asociación de  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$  y  $Cl^-$  que provienen de la sal marina.
- **De agricultura y suelo** Si predomina la combinación de cationes básicos ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  y  $K^+$ ) y solutos nitrogenados ( $NO_3^-$  y  $NH_4^+$ ), derivados de fertilizantes y partículas de polvo.

Los resultados se presentan en las siguientes Tablas:

**Tabla 5.25 Factores de correlación de Pearson aniones y cationes. Región Noreste**

Factores de correlación de Pearson									
	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	pH
Sodio	1.00	0.09	0.13	<b>.664**</b>	0.28	0.28	0.09	0.14	0.10
Amonio		1.00	<b>.573**</b>	0.04	0.22	-0.04	<b>.505**</b>	<b>.622**</b>	0.15
Potasio			1.00	0.20	0.00	0.01	<b>.680**</b>	<b>.599**</b>	-0.15
Magnesio				1.00	0.33	0.31	0.20	0.31	0.01
Calcio					1.00	0.18	0.22	0.32	-0.17
Cloruro						1.00	0.13	0.32	-0.24
Nitrato							1.00	<b>.858**</b>	<b>-.451**</b>
Sulfato								1.00	-0.33
pH									1.00

\* Significativo a 0.05% \*\* significativo a 0.01%

Las muestras colectadas en la Región Noreste presentan los valores más altos de Sulfatos, con mediana de 60  $\mu\text{Eq/L}$  y distribuciones de 20 a 30 Kg/Ha.

Los principales contra-iones determinados fueron el amonio y el calcio (90 y 50  $\mu\text{Eq/L}$  respectivamente), la concentración relativa del amonio es del 50 al 60 % con respecto a los iones totales. De acuerdo con los coeficientes de correlación de Pearson, las especies predominantes son nitrato y sulfato de amonio y carbonato de sodio y calcio.

**Tabla 5.26 Factores de correlación de Pearson aniones y cationes Región Noroeste**

Factores de correlación de pearson									
	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	pH
Sodio	1.00	0.25	.485*	<b>.795**</b>	0.13	<b>.866**</b>	0.29	0.08	0.32
Amonio		1.00	0.33	0.29	.713**	.458*	.463*	<b>.644**</b>	0.00
Potasio			1.00	0.37	0.04	<b>.509*</b>	<b>.597**</b>	<b>.539**</b>	-0.20
Magnesio				1.00	0.20	<b>.674**</b>	0.34	0.13	0.29
Calcio					1.00	0.24	0.28	0.35	0.05
Cloruro						1.00	0.16	0.26	0.30
Nitrato							1.00	<b>.699**</b>	-.473*
Sulfato								1.00	-.418*
pH									1.00

\* Significativo a 0.05% \*\* significativo a 0.01%

Las muestras colectadas en la región Noroeste presentan concentraciones de sulfato, con mediana de 70  $\mu\text{Eq/L}$  y distribuciones de 20 a 30 Kg/ha.

Los principales contra-iones determinados fueron el amonio y el calcio, al igual que en la región Noreste. De acuerdo con los coeficientes de correlación de Pearson, las especies predominantes son cloruro de sodio y de magnesio, Nitrato de Potasio, Sulfato de amonio, carbonato de sodio y calcio.

**Tabla 5.27 Factores de correlación de Pearson aniones y cationes. Región Centro**

Factores De Correlación De Pearson									
	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	pH
Sodio	1.00	-0.24	0.41	<b>.760**</b>	-0.12	0.08	<b>.522**</b>	<b>.402*</b>	-0.22
Amonio		1.00	<b>.549**</b>	-0.03	<b>.713**</b>	0.13	0.23	0.25	0.22
Potasio			1.00	<b>.547**</b>	0.29	0.13	<b>.708**</b>	<b>.618**</b>	-0.04
Magnesio				1.00	0.00	0.24	<b>.590**</b>	<b>.518**</b>	0.01
Calcio					1.00	0.07	-0.02	0.01	0.11
Cloruro						1.00	0.25	<b>.368*</b>	0.14
Nitrato							1.00	<b>.856**</b>	-0.26
Sulfato								1.00	-0.27
pH									1.00

\* Significativo a 0.05% \*\* significativo a 0.01%

Los coeficientes de correlación Indican la formación de sulfatos y nitratos de sodio, magnesio y potasio. Se observa que, el amonio esta fuertemente correlacionado con el calcio, por lo que se puede sugerir que comparten un anion, el carbonato. El cual posiblemente llevó a cabo reacciones de neutralización, por lo cual se identificaron muy pocos eventos de lluvia ácidos.

**Tabla 5.28 Factores de correlación de Pearson aniones y cationes. Región Suroeste**

Factores de correlación de Pearson									
	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	pH
Sodio	1.00	<b>.226**</b>	<b>.375**</b>	<b>.369**</b>	<b>.222**</b>	<b>.361**</b>	<b>.184**</b>	0.08	<b>.136*</b>
Amonio		1.00	<b>.514**</b>	<b>.147*</b>	<b>.556**</b>	<b>.184**</b>	<b>.540**</b>	<b>.568**</b>	<b>-.137*</b>
Potasio			1.00	<b>.473**</b>	<b>.433**</b>	<b>.264**</b>	0.11	<b>.138*</b>	0.03
Magnesio				1.00	<b>.428**</b>	<b>.447**</b>	<b>.220**</b>	<b>.298**</b>	<b>.193**</b>
Calcio					1.00	<b>.353**</b>	<b>.466**</b>	<b>.533**</b>	-0.03
Cloruro						1.00	<b>.262**</b>	<b>.285**</b>	-0.04
Nitrato							1.00	<b>.762**</b>	<b>-.139*</b>
Sulfato								1.00	<b>-.162**</b>
pH									1.00

\* Significativo a 0.05% \*\* significativo a 0.01%



La región suroeste, presentó más eventos de carácter ácido que otras regiones. A excepción de la estación LOM, las otras estaciones presentaron una mediana de 40  $\mu\text{Eq/L}$ . De acuerdo a los coeficientes de correlación se puede asociar al nitrato y sulfato de amonio, sulfato de calcio, cloruro de sodio y de magnesio.

**Tabla5.29 Factores de correlación de Pearson aniones vs cationes. Región Suroeste**

Factores De Correlación De Pearson									
	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	pH
Sodio	1	.180	.327**	.435**	.280*	.246*	.450**	.384**	.196
Amonio		1	.283*	.321**	.439**	.409**	<b>.651**</b>	<b>.556**</b>	.135
Potasio			1	<b>.809**</b>	<b>.628**</b>	.328**	<b>.589**</b>	<b>.714**</b>	.126
Magnesio				1	.477**	.383**	<b>.558**</b>	<b>.558**</b>	<b>.225*</b>
Calcio					1	.286*	<b>.679**</b>	<b>.782**</b>	.170
Cloruro						1	.363**	.351**	.043
Nitrato							1	<b>.856**</b>	.051
Sulfato								1	.039
pH									1

\* Significativo a 0.05%    \*\* significativo a 0.01%

La región sureste presentó valores máximos de concentración del ion Sulfato. El sulfato y el nitrato se encuentran fuertemente correlacionados y pueden asociarse con el amonio, potasio, magnesio y Calcio.

Ante la abundancia del Ion sulfato en las muestras, se decidió investigar su contribución en las dos siguientes categorías;

### 5.5.1 ASOCIACIONES DE ORIGEN ÁCIDO

El componente ácido aporta hasta el 10% en las estaciones ubicadas en la región Noreste; y 12% en la región Noroeste, mientras que las estaciones ubicadas en la región Sureste presentan un máximo del 15% y los sitios del Suroeste hasta un 30% (Figura 5.36)

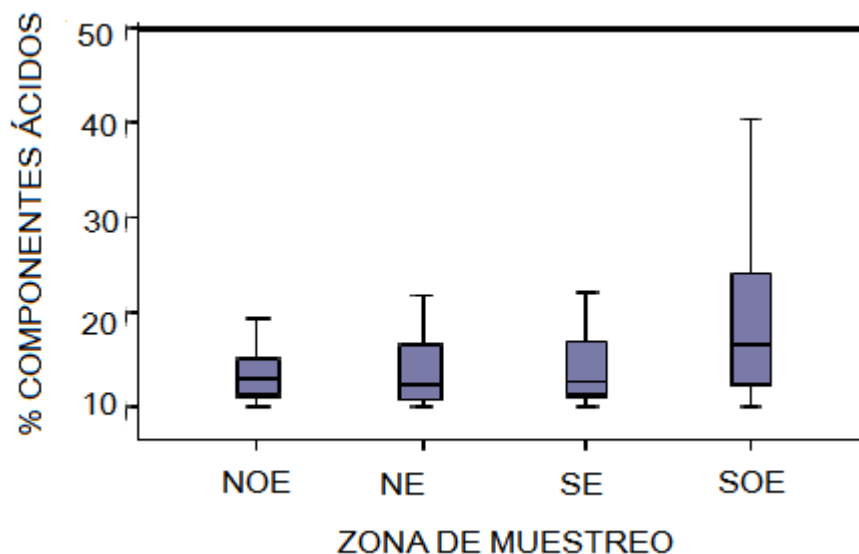


Figura 5.36 Contribución del ión H<sup>+</sup>, en la acidez de las muestras

### 5.5.2 ASOCIACIONES DE ORIGEN AGRICULTURA Y SUELO

La contribución de iones de suelo en las muestras de la región sureste es del 63%, seguida de las regiones suroeste y noroeste con un promedio del 58%, y la región noreste con 57%.

La importancia de identificar estas especies radica en la capacidad de neutralización que tienen los compuestos existentes en la corteza terrestre (amonio, magnesio y calcio). Por su abundancia relativa en las muestras, se puede inferir que el ion amonio y calcio son quienes mas contribuyen a la alcalinización de las muestras.

De acuerdo a su composición en la siguiente Figura se presentan las principales composiciones identificadas en las muestras de lluvia del periodo de muestreo 2003 – 2009.

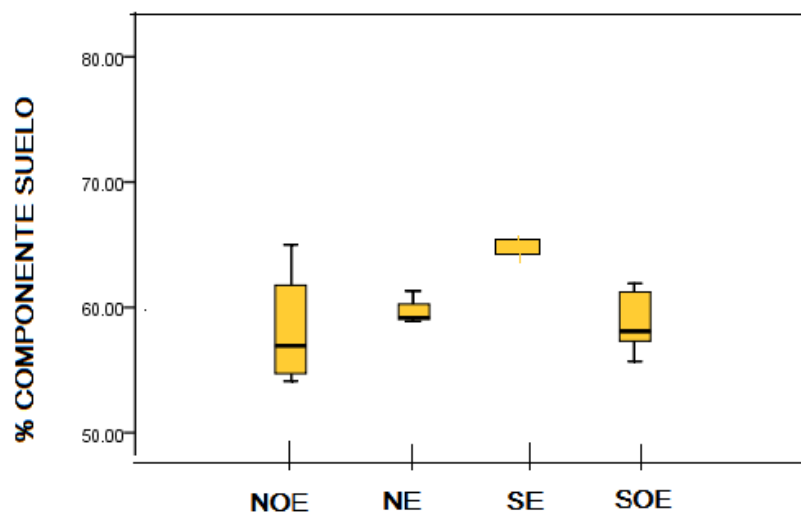


Figura 5.37 Porcentaje de especies de origen suelo en muestras de depósito húmedo colectadas en el periodo 2003 – 2009

En general como se observa en la Figura 5.38, el origen predominante de las especies iónicas es de suelo, seguidas de origen ácido y la contribución menor es de origen marino.

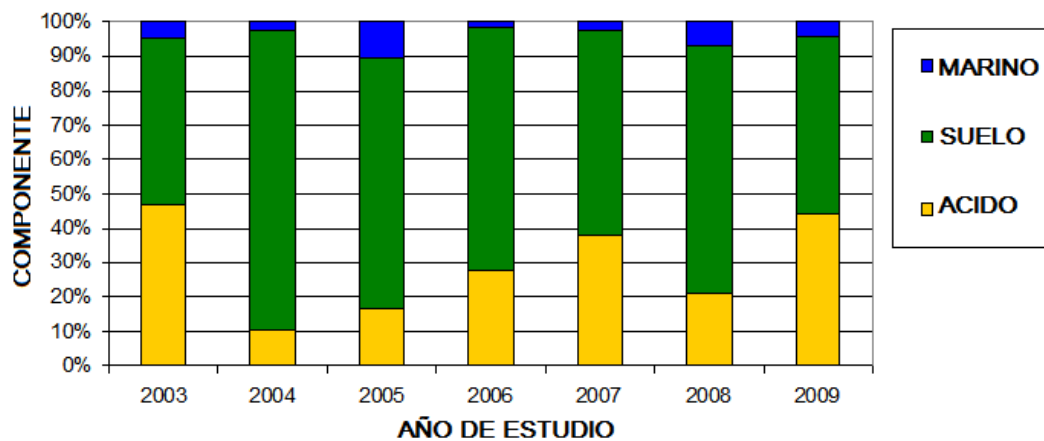


Figura 5.38 Posibles orígenes de las especies que constituyen las muestras de depósito húmedo colectadas en el periodo 2003 – 2009

## 5.6 TENDENCIAS

Como se observó en la sección de pH, todas las estaciones presentaron un incremento en la acidez de las muestras a partir del año 2006, esta disminución en el pH está correlacionada con la concentración del ión sulfato y nitrato, lo cual sugiere que la acidez de las muestras fue el resultado de la formación de ácido sulfúrico y nítrico respectivamente, los cuales, como ya se ha mencionado, son producto de las reacciones del  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$  emitido a la atmósfera.

Para calcular las tendencias, se trabajó con el valor de pH ponderado anual, y se tomó el primer año de estudio como referencia. Posteriormente se calculó para cada región la media móvil durante todo el periodo de estudio, como se muestra a continuación:

Para todas las regiones se observó la misma tendencia, se muestra que, el valor de pH se mantuvo durante los primeros tres años (2003, 2004 y 2005) y disminuyó en los años 2006 y 2007, mostrando un ligero incremento en los años subsecuentes (Figura 5.39, 5.40, 5.41 y 5.42).

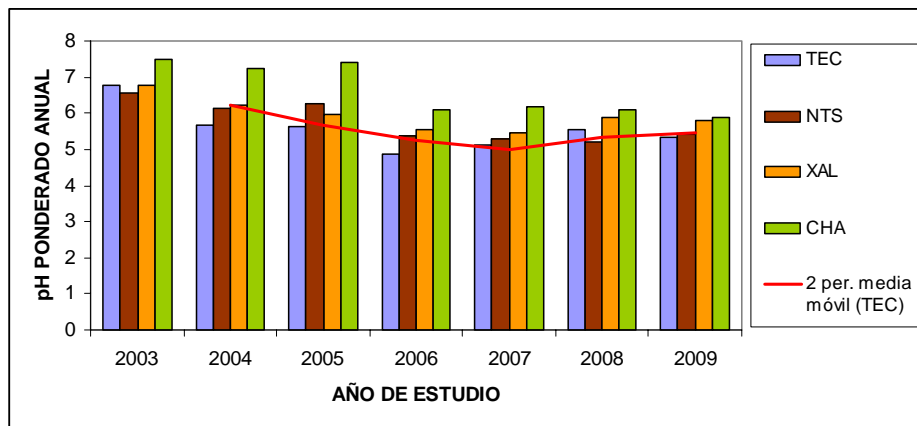


Figura 5.39 Variación anual de pH ponderado en la región Noreste

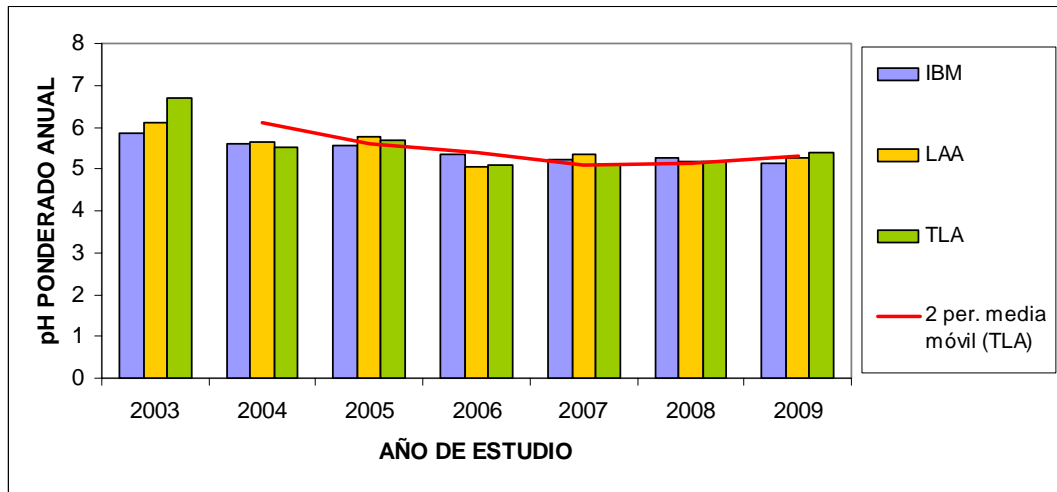


Figura 5.40 Variación anual de pH ponderado en la región Noroeste

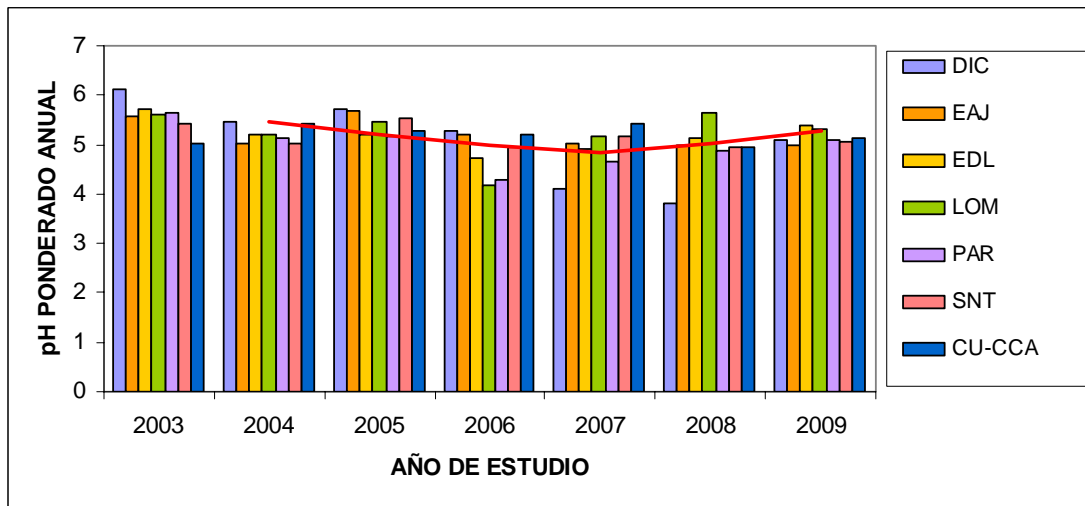


Figura 5.41 Variación anual de pH ponderado en la región Suroeste

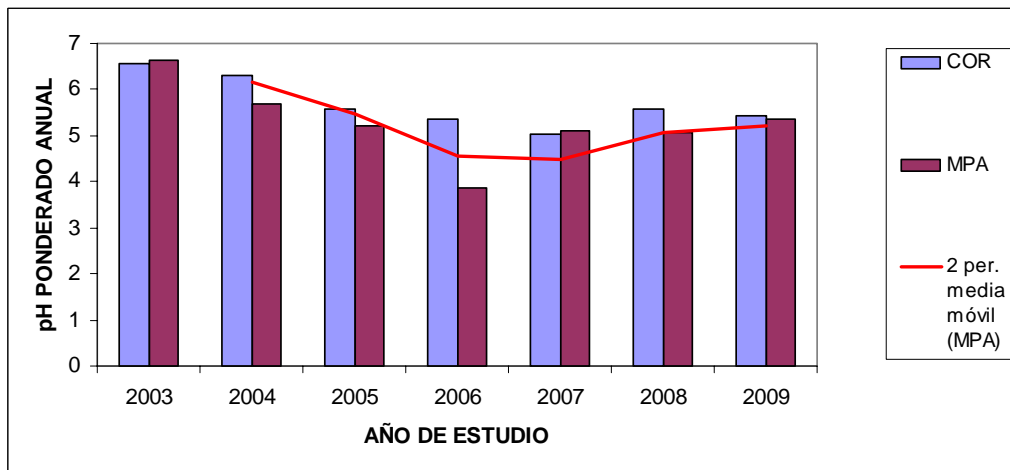
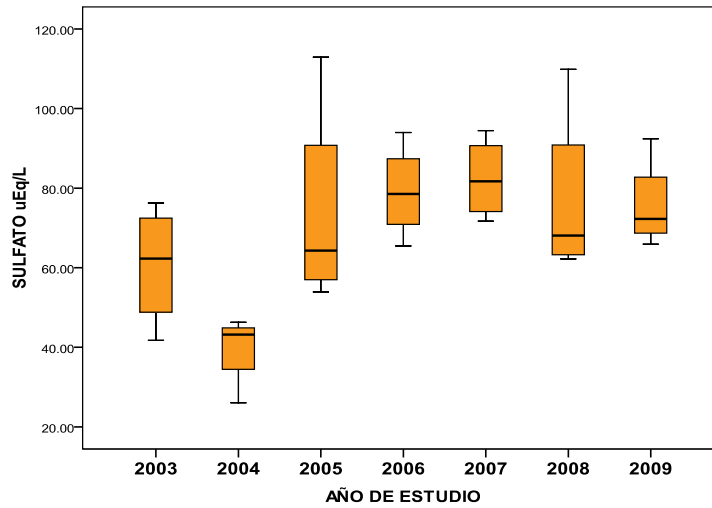
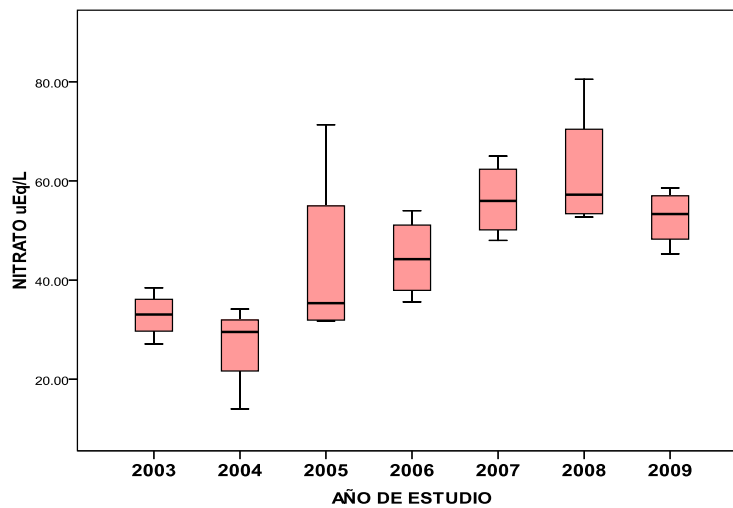


Figura 5.42 Variación anual de pH ponderado en la región Sureste

Al considerar la variación de la concentración de sulfato y nitrato con respecto al tiempo, se observó que a partir del año 2004, se da un incremento considerable en la concentración de sulfato para los años 2005 y 2006, manteniéndose en 2007 y disminuyendo para los años posteriores (Figura 5.43), lo cual coincidió, con el incremento en la acidez de las muestras colectadas en estos años.



**Figura 5.43 Variación de la concentración de sulfato durante el periodo 2003-2009**



**Figura 5.44 Variación de la concentración de nitrato periodo 2003-2009**

Sin embargo al comparar la variación de la concentración de sulfato y nitrato, con las emisiones de y  $\text{SO}_2$  reportadas en el Inventario Nacional de emisiones (INEM 2006, 2008), se observa una relación proporcional indirecta; los años que presentan menor emisión de  $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_2$ , presentan mayor acidez en los eventos de deposito húmedo colectados (Figura 5.45 y 5.46).

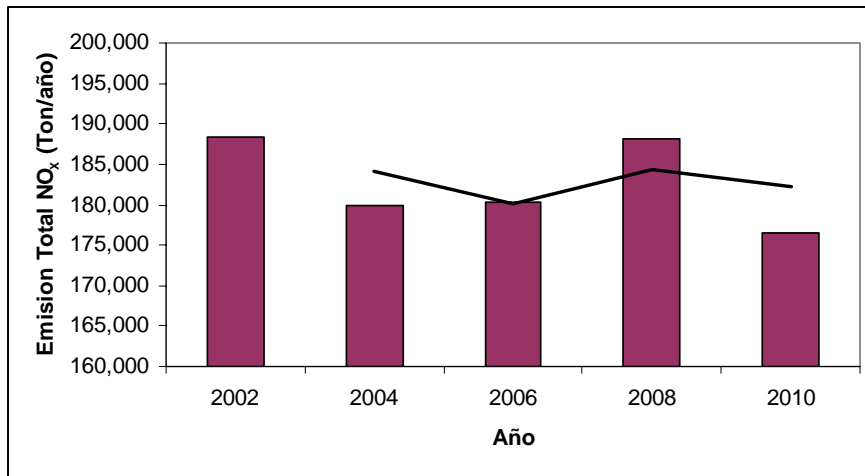


Figura 5.45 Variación de la concentración de  $\text{NO}_x$  periodo 2003-2009

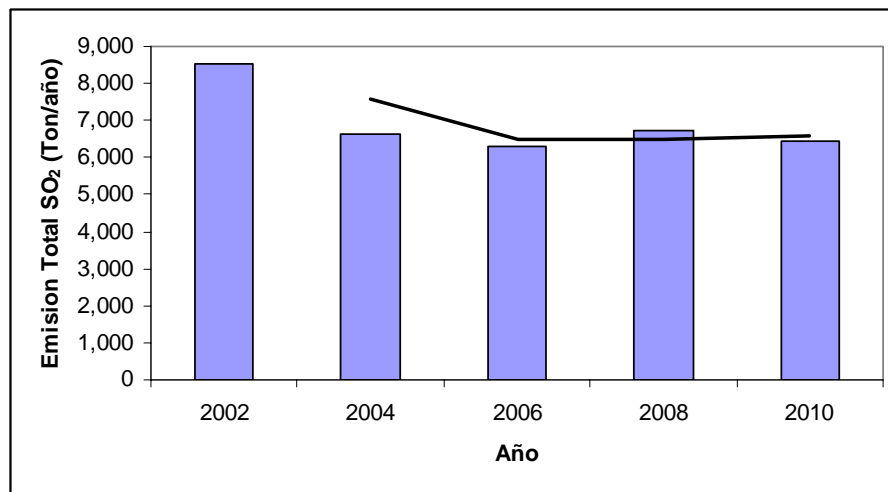
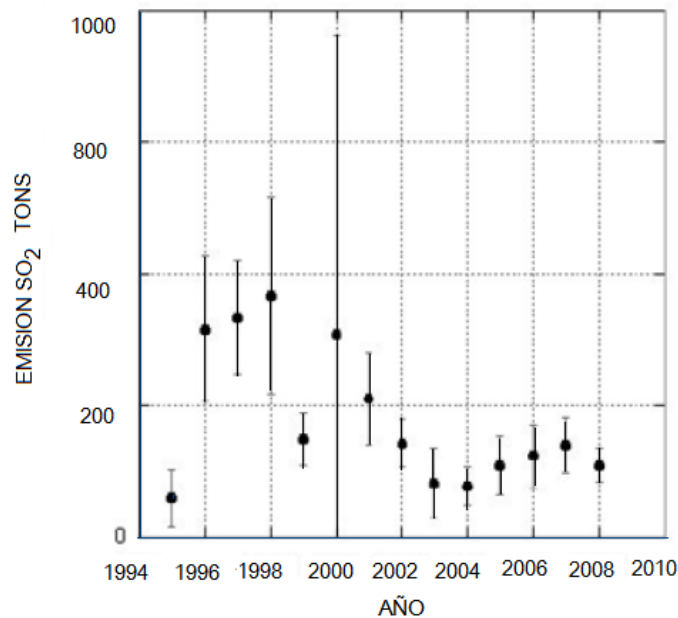


Figura 5.46 Variación de la concentración de  $\text{SO}_2$  periodo 2003-2009

Lo que conlleva a considerar la importancia de tener inventarios de emisión reales que no estén basados en factores de emisión, así como tener conocimiento de la reactividad química de la atmósfera de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Por otro lado, al considerar otras fuentes de emisión como la generación de  $\text{SO}_2$  provenientes del volcán Popocatepetl, se puede observar que, posterior al año 2004, las emisiones se incrementaron con máximos en los años 2006 y 2007, tendencia similar a la concentración de sulfatos y a la acidez presentada en las muestras de depósito húmedo colectadas en el periodo de estudio (Figura 5.47).



**Figura 5.47 Producción anual del volcán Popocatépetl de  $\text{SO}_2$  de 1995 a 2008.** (Tomada de Delgado et al. 2009)



## 5.7 CARGAS CRÍTICAS DE NITROGENO Y AZUFRE

La deposición atmosférica elevada en azufre (S) y nitrógeno (N), contribuye a la acidificación de los suelos y de aguas superficiales, causando efectos negativos sobre la vegetación forestal y la biota acuática. La deposición ácida puede conducir al agotamiento de cationes básicos de nutrientes, mientras que el exceso de N puede conducir a la saturación. En última instancia, tanto la deposición de N y S pueden conducir a desequilibrios de nutrientes, aumento de la susceptibilidad a plagas, enfermedades y la disminución de la productividad forestal y la salud.

La Zona Metropolitana de la Ciudad México (ZMCM), ha presentado por más de siete años consecutivos el fenómeno de la lluvia ácida y la región Suroeste es la más afectada por este fenómeno, la cual se encuentra constituida en su mayoría por suelo de conservación. Por lo anterior, es importante en un futuro calcular la carga crítica de “N” y “S” que puede soportar un ecosistema dentro de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Se define como carga crítica, a la deposición por debajo de la cual, los efectos nocivos para un ecosistema no se produzcan. Mientras que, la Excedencia, es la cantidad por la cual el depósito supera la carga crítica.

Numerosos autores han estudiado los flujos de deposición de N y S, así como sus cargas críticas, dentro de un ecosistema determinado (terrestre o acuático), algunos estudios se resumen en las siguientes tablas, en las cuales se puede observar que la variación de las cargas críticas es dependiente de la zona de estudio.

**Tabla 5.30 Deposición y carga crítica de Nitrógeno**

AUTOR	AÑO	CARGA CRÍTICA DE N (Kg / ha /año)	SITIO DE ESTUDIO
Jones et al.	2005	10	Pastizales de Montaña.Reino Unido
Power et al.	2006	8	Pastizales de Montaña.Reino Unido
Hitbrunner et al.	2008	5	Ecosistemas alpinos
Fen et al.	2003	3 – 6	Zonas templadas en Estados Unidos
Fen et al.	2010	3 – 8	California, Estados Unidos
Geiser	2010	4 - 7	Arizona, Nuevo México

**Tabla 5.31 Deposición y carga crítica de Azufre**

AUTOR	AÑO	CARGA CRÍTICA DE S (Kg / ha /año)	SITIO DE ESTUDIO
Dieter et al.	2008	17 - 21	Alemania
Dieter et al.	2008	20 - 40	Europa
Dieter et al.	2008	2 - 5	Climas Húmedos
Ponnette et al.	2010	8 - 17	Veracruz

De acuerdo a la composición química de la lluvia y la abundancia relativa de los iones determinados. La acidez de las muestras se debe principalmente a la formación de  $H_2SO_4$ . El anión mas abundante determinado en las muestras de lluvia fue  $SO_4^{2-}$ , el cual representó el 50% de todos los aniones, seguido por las concentraciones de  $NO_3^-$  (40%) y el  $Cl^-$  (10%).

La concentración de  $SO_4^{2-}$  y  $NO_3^-$  ( $\mu Eq/L$ ) determinada en las muestras de lluvia, alcanzó valores máximos en la región Norte. Debido a su concentración por los bajos volúmenes de lluvia. Sin embargo la distribución de  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$  y  $Cl^-$ , en kilogramos por hectárea es mayor en las estaciones ubicadas en la región Suroeste, la cual, presenta un promedio de 3.10 y 4.98 Kg/ha/año de N y S respectivamente. Valores por debajo de los reportados en la literatura.

Existen pocos datos sobre los flujos y cargas críticas del N y S en la ZMCM, por lo cual se sugiere elaborar estudios que permitan determinar si se ha llegado a la excedencia en la deposición de estos elementos.

En general, los resultados obtenidos fueron:

En la Zona Metropolitana de la Ciudad México (ZMCM), se ha presentado por más de siete años consecutivos el fenómeno de la lluvia ácida. En este estudio se caracterizó el depósito húmedo durante el periodo de 2003 a 2009 y se identificó que la región más afectadas por éste fenómeno es la región Suroeste.

La región Suroeste, presentó un valor promedio de pH ponderado en seis años (2003 -2009) de 4.41 y un valor máximo anual ponderado de seis años (2003 – 2009) de 5.21. Mientras que la estación CHA (viento arriba) presentó un valor de 6.28

La tendencia del valor de pH ponderado anual ha disminuido con respecto al tiempo, Tomando como ejemplo la región Centro, en la cual el valor de pH ponderado en el año 2003 fue de 5.93 y disminuyó hasta 4.37 en el año 2009.

De acuerdo a la composición química de la lluvia y la abundancia relativa de los iones determinados. La acidez de las muestras se debe principalmente a la formación de  $H_2SO_4$ . El anión mas abundante determinado en las muestras de lluvia fue  $SO_4^{2-}$ , el cual representó el 50% de todos los aniones, seguido por las concentraciones de  $NO_3^-$  (40%) y el  $Cl^-$  (10%).

La concentración de  $SO_4^{2-}$ , y  $NO_3^-$  ( $\mu Eq/L$ ) determinada en las muestras de lluvia, alcanzó valores máximos en la región Norte. Debido a su concentración por los bajos volúmenes de lluvia. Sin embargo la distribución de  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$  y  $Cl^-$ , en kilogramos por hectárea es mayor en las estaciones ubicadas en la región Suroeste y se encuentran por debajo de las cargas críticas reportadas en la literatura.

Se identificaron tres posibles orígenes de los componentes del depósito húmedo: el origen ácido, el origen marino y el enriquecimiento por aerosoles y/o partículas provenientes del suelo. La asociación de los iones  $\text{SO}_4^{2-}$  con respecto a los iones  $\text{H}^+$  mostró un máximo de 30% para la zona suroeste y un 10% para las otras áreas. Con respecto a la neutralización con partículas y aerosoles provenientes del suelo, la contribución del ion sulfato, constituyó alrededor del 60%.

La acidez en los eventos de depósito húmedo, tiene una tendencia similar a las emisiones de  $\text{SO}_2$  del volcán Popocatepetl, lo que explica la generación de iones sulfato y la acidificación de las muestras, sin embargo, no se encontró la misma tendencia al comparar las concentraciones de  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$  reportadas por el Inventario Nacional de Emisiones.

Se identificaron tres componentes principales, el principal conformado por los iones mayoritarios ( $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$ ) y sus contra-iones ( $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{NH}_4^+$ ). Así como los iones  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$  que confirma la aportación de aerosoles de origen marino en las muestras.

En el eje del segundo componente, se observa que el pH y la alcalinidad están directamente asociados con la región de muestreo (Norte, Centro o Sur) de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. De acuerdo a ello, las estaciones más ácidas son Parres (PAR), San Nicolás Totolapan (SNT) y Lomas (LOM) de la región Suroeste y las mayores concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$  se han determinado en las estaciones Cerro del Tepeyac (TEC), Nezahualcoyotl Sur (NTS), Ecoguardas Ajusto (EAJ), Xalostoc (XAL), Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA) y Corena (COR).

Con respecto al componente 3, se observa una fuerte correlación entre el  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{HCO}_3^-$ , dicha relación sugiere su procedencia de compuestos comúnmente usados en fuegos artificiales, explosivos primarios, etc.

**CAPÍTULO 6**  
**APLICACIÓN DE TRAYECTORIAS**

## CAPÍTULO 6

### TRAYECTORIAS DE RETROCESO

Se define como trayectoria, al conjunto de posiciones que ha asumido una partícula por efecto del movimiento de parcelas de aire individuales, la cual describe el camino recorrido por dicha partícula, para desplazarse de un punto a otro.

Las trayectorias de retroceso (“Backward trajectories”) son herramientas que permiten estimar el transporte de los contaminantes y los cambios en las concentraciones ambientales de los diferentes contaminantes a través del tiempo, relacionando las regiones donde se localizan las fuentes de emisión y las zonas receptoras de interés (NAPAP 1990).

A través del seguimiento de las parcelas de aire que dieron origen a los eventos de lluvia registrados en las estaciones de muestreo, se elaboraron algunas trayectorias de retroceso con el modelo HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model), con el objetivo de identificar las posibles fuentes de emisión de los contaminantes que dieron origen a la lluvia ácida. Los cálculos de trayectoria muestran una dirección general, la razón de dispersión se calcula a partir del perfil de difusión vertical, la cizalladura y la deformación horizontal del campo de viento.

HYSPLIT es una herramienta sencilla, que calcula tanto trayectorias simples como dispersión de contaminantes y también simulaciones de deposición.

HYSPLIT usa datos meteorológicos registrados en una base de datos, los cuales se pueden obtener de la National Oceanic and Atmospheric Administration de los Estados Unidos (NOAA –EU), y posee una resolución de  $1^\circ \times 1^\circ$ , con una resolución de 40Km x 40 Km.

El programa fue usado desde la red, ya que su uso es simple y no requiere de mucha información, la cual se enlista a continuación:

- Latitud del sitio (19°19' 32")
- Longitud del sitio (99°10' 33")
- Altitud del sitio (2250 m)
- Fecha y hora del evento
- Tipo de trayectoria: hacia delante o hacia atrás

Para la obtención de las trayectorias, se realizó un registro de los eventos de lluvia ácida para la estación CU, la cual fue seleccionada porque se tenía completa seguridad sobre la obtención, manejo y validación de los datos.

Con el objetivo de observar la aportación local y el transporte de largo alcance de los precursores, se corrieron las trayectorias a 24 y 72 horas.

Se tomaron como puntos de referencia la hora inicial del evento de lluvia y algunos datos atmosféricos presentados durante los eventos de lluvia de los años 2003 al 2009 en la zona de estudio.

Como resultado se obtuvo un mapa por cada trayectoria, la cual muestra el recorrido de la parcela antes de incidir sobre la región de estudio. Dichas trayectorias fueron integradas en una sola imagen mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Previamente a dicho cálculo, se investigaron las posibles fuentes de emisión cuyos NOx y SOx pudieron incorporarse, durante el recorrido a las parcelas de aire que dieron origen a los eventos de lluvia.

## 6.1 FUENTES LOCALES DE PRECURSORES DE LLUVIA ÁCIDA

Las emisiones de precursores de lluvia ácida fueron descritas en la sección 2.2, en éste capítulo se muestra la localización de las principales fuentes puntuales que contribuyen con la emisión importante de precursores de lluvia ácida en la zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM). La prevalencia del ión sulfato y nitrato en las muestras de depósito húmedo es interesante porque existen varias fuentes de emisión de sus precursores alrededor de La ZMCM; la contaminación vehicular, las emisiones del volcán Popocatepetl, las centrales eléctricas y termoeléctricas, así como la refinería de Tula, Hidalgo.

De acuerdo al inventario de emisiones del año 2007 (INEM-2007), las fuentes móviles contribuyen con el 17% del total de  $\text{SO}_2$  emitido a la atmósfera, en su mayoría por los autos particulares (44%) y en menor cantidad los vehículos Diesel aunque estos también contribuyen a la emisión de  $\text{NO}_x$ . con más del 40% (Figura 6.1 y 6.2)

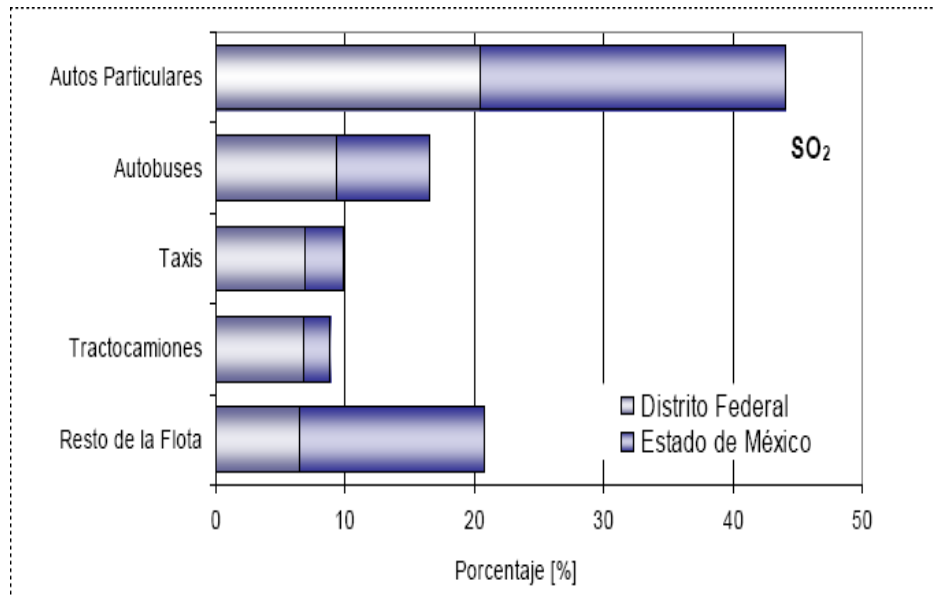


Figura 6.1 Emisiones porcentuales de  $\text{SO}_2$  de las Fuentes Móviles



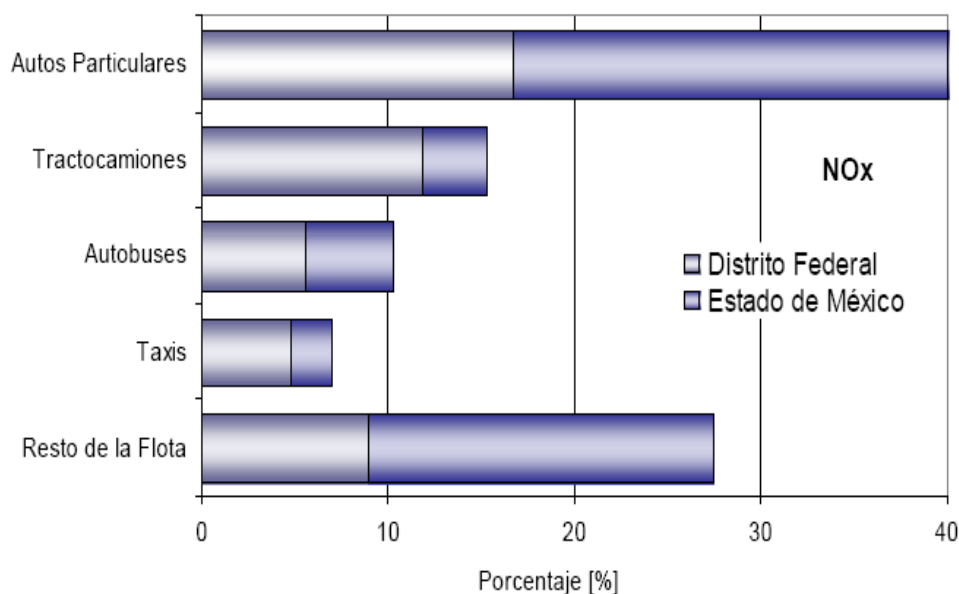


Figura 6.2 Emisiones porcentuales de NOx de las Fuentes Móviles

Se investigó en el Inventario Nacional de Emisiones (INEM-2007) la cantidad de precursores que se emiten a la atmósfera tanto en el D.F., como en el Edo. de México (Anexo 3). El INEM muestra que las delegaciones Iztapalapa, Gustavo A. Madero, y los Municipios de Nezahualcoyotl y Ecatepec contribuyen mayoritariamente a la emisión de NOx y SOx. Destacan las emisiones de SOx en los Estados de Puebla y Guerrero (Tabla 6.1) donde las principales emisiones son debidas al volcán Popocatepetl.

Tabla 6.1 Principales Emisiones de los precursores de lluvia ácida en el Distrito Federal y Otros Estados (Ton/año)

Entidad, Municipio o Estado	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	NH <sub>3</sub>
Iztapalapa	18,013.50	1,311.70	1,672.70
Gustavo A. Madero	12,557.10	748.60	1,154.00
Ecatepec	15,927.70	5,614.00	1,560.10
Nezahualcóyotl	11,166.90	1,904.10	1,163.90
Puebla	42,981.40	1,871,440.00	61,225.30
Morelos	14,610.2	13,863.40	11,973.70
Guerrero	40,706.40	1,297,720.70	52,280.20

Conociendo la ubicación de estos sitios, es posible determinar si estos contribuyen al enriquecimiento de nubes con precursores de lluvia ácida.

## 6.2 ANALISIS DE LAS TRAYECTORIAS

Para el análisis de trayectorias de retroceso, se introdujeron como datos de entrada la ubicación específica del sitio, la fecha y hora de cada evento de precipitación registrado. Se realizaron corridas con el modelo de meso escala Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model (HYSPLIT) utilizando datos archivados en el sistema GDAS (Global Data Assimilation System).

Las trayectorias se procesaron utilizando una altitud de 500 mbars sobre el nivel del Mar. Cada trayectoria correspondía a las 72 horas anteriores al evento de la precipitación, ya que es el tiempo comúnmente aceptado como necesario para la incorporación de las partículas antropogénicas a las nubes (Celle-Jeanton, et al. 2008).

Se analizaron los eventos con menor valor de pH en cada mes. Las trayectorias fueron calculadas a 21 UTC (Tiempo Universal Coordinado), es decir el tiempo horario de la zona menos 6 horas.

En las siguientes Figuras (6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 6.7) se muestran las trayectorias de retroceso, correspondientes a los eventos de lluvia durante un año específico, las trayectorias individuales fueron clasificadas de la forma siguiente:

- - - - Eventos cuya concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$  es mayor a 20 ppm
- \_\_\_\_\_ Eventos cuya concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$  es 10ppm > 20 ppm
- \_\_\_\_\_ Eventos cuya concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$  es 5ppm > 10 ppm

Las trayectorias muestran la contribución de las emisiones que provienen del Golfo de México, el volcán Popocatepetl, la región de Tula-Hidalgo y la industria local del estado de México.

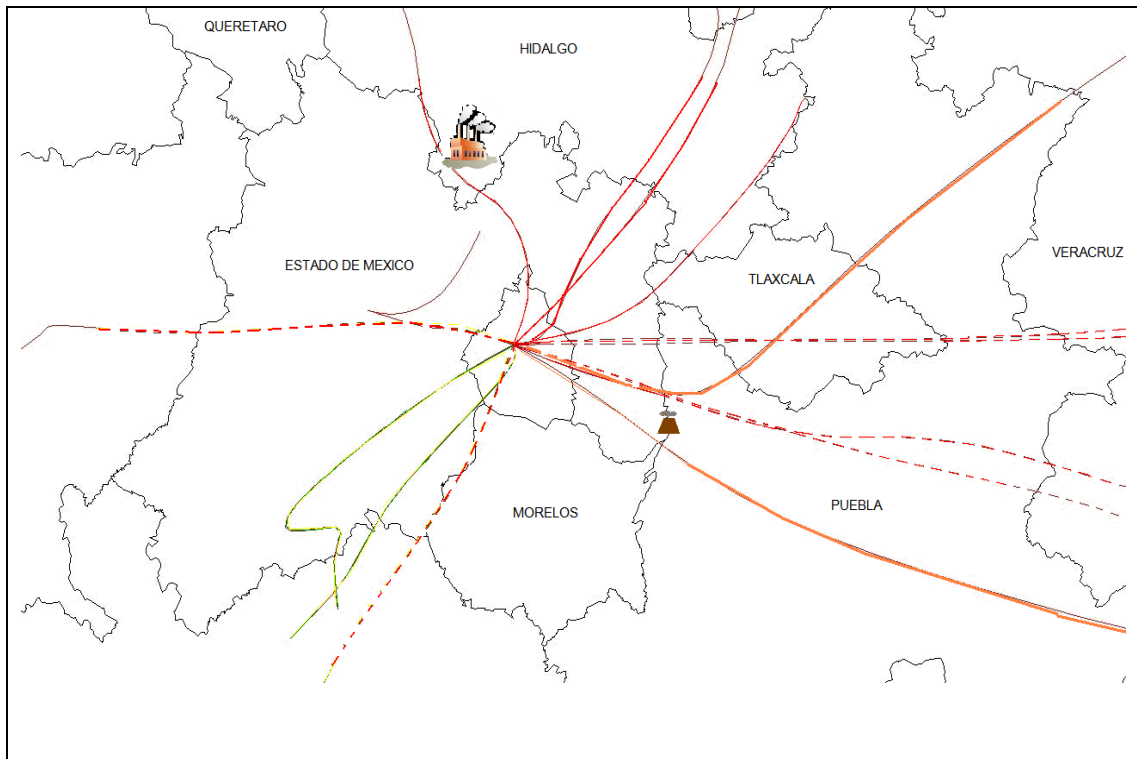


Figura 6.3 Trayectorias de los eventos de lluvia ácida en la ZMCM. año 2003

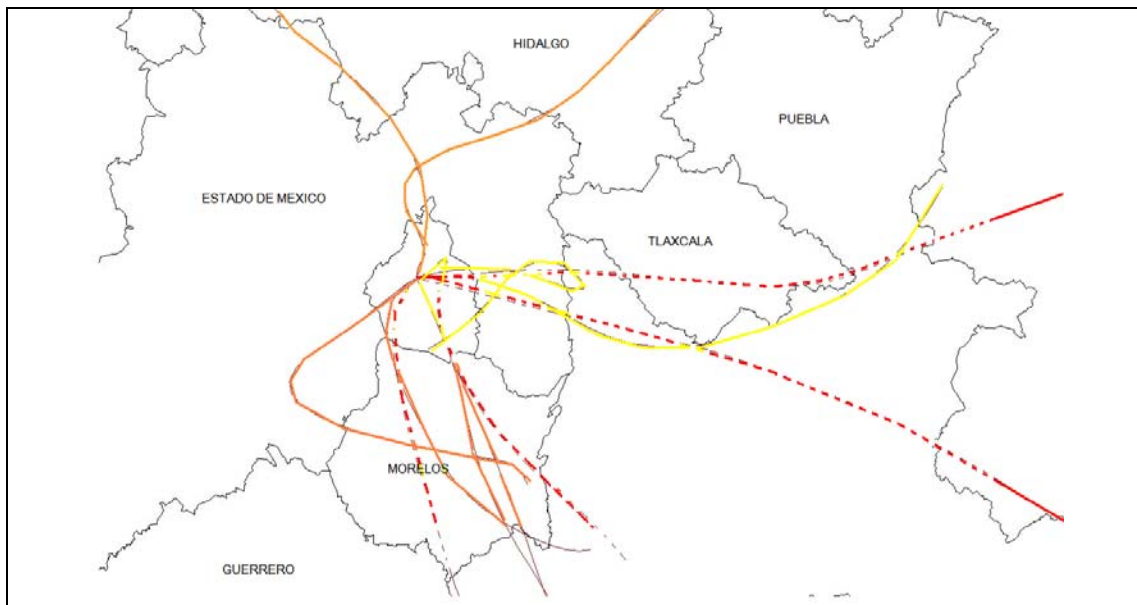


Figura 6.4 Trayectorias de los eventos de lluvia ácida en la ZMCM. Año 2004

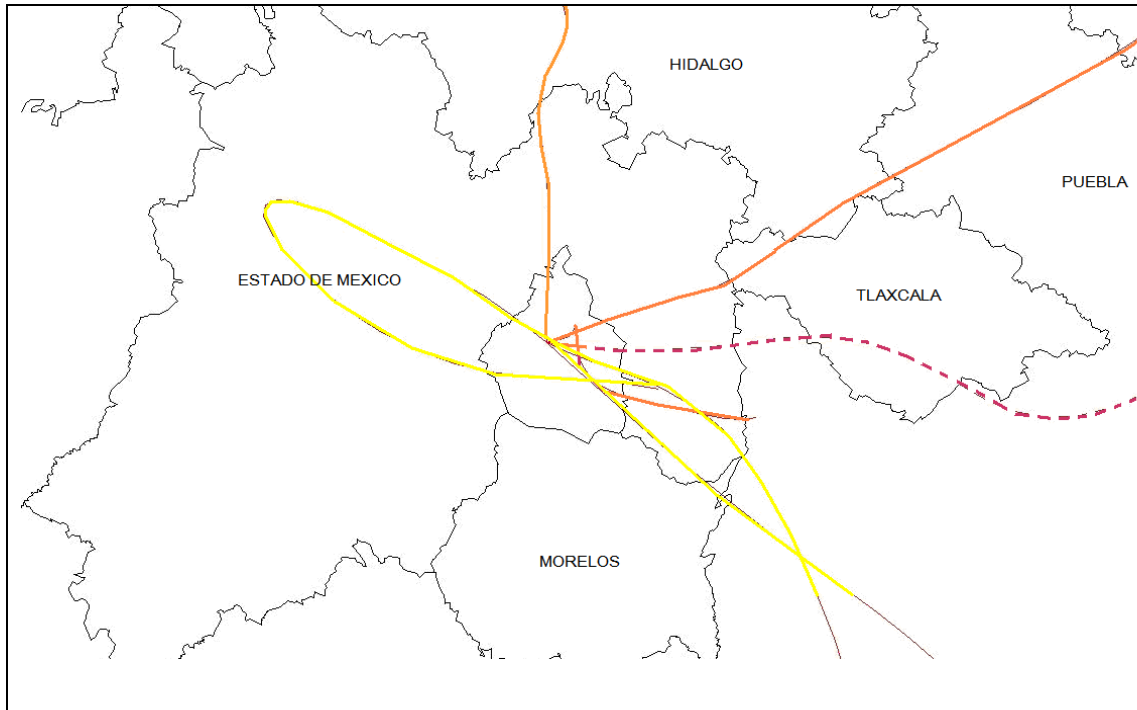


Figura 6.5 Trayectorias de los eventos de lluvia ácida en la ZMCM. Año 2005

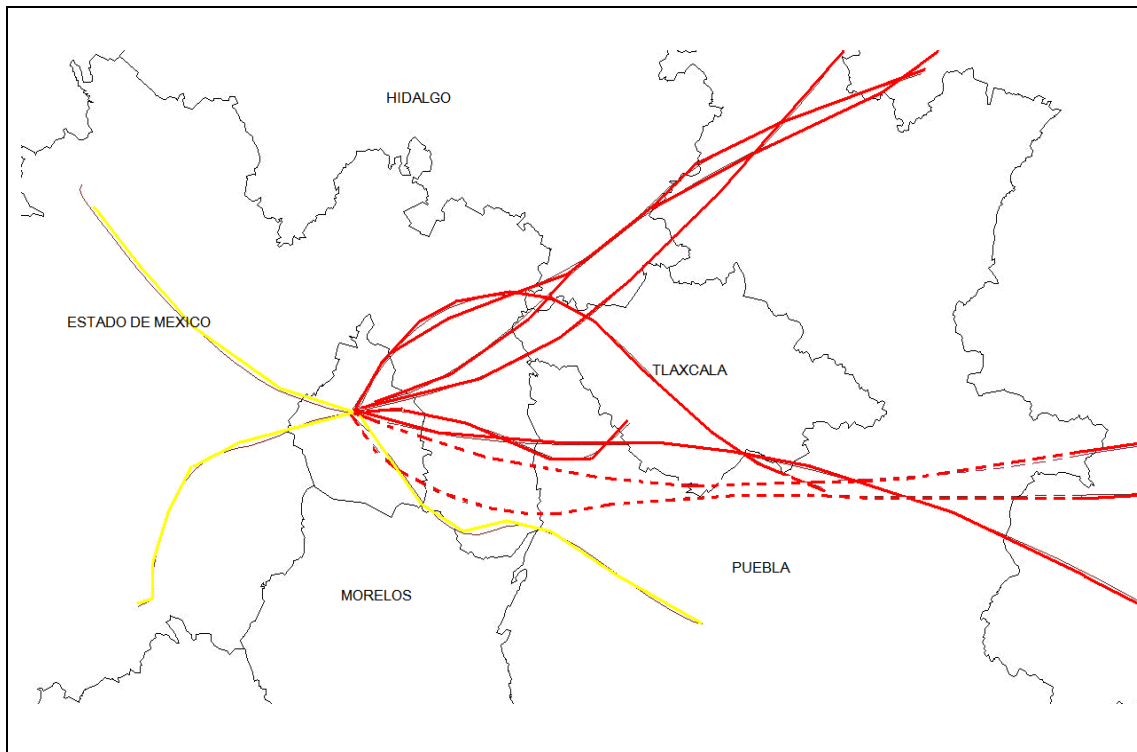


Figura 6.6 Trayectorias de los eventos de lluvia ácida en la ZMCM. Año 2006

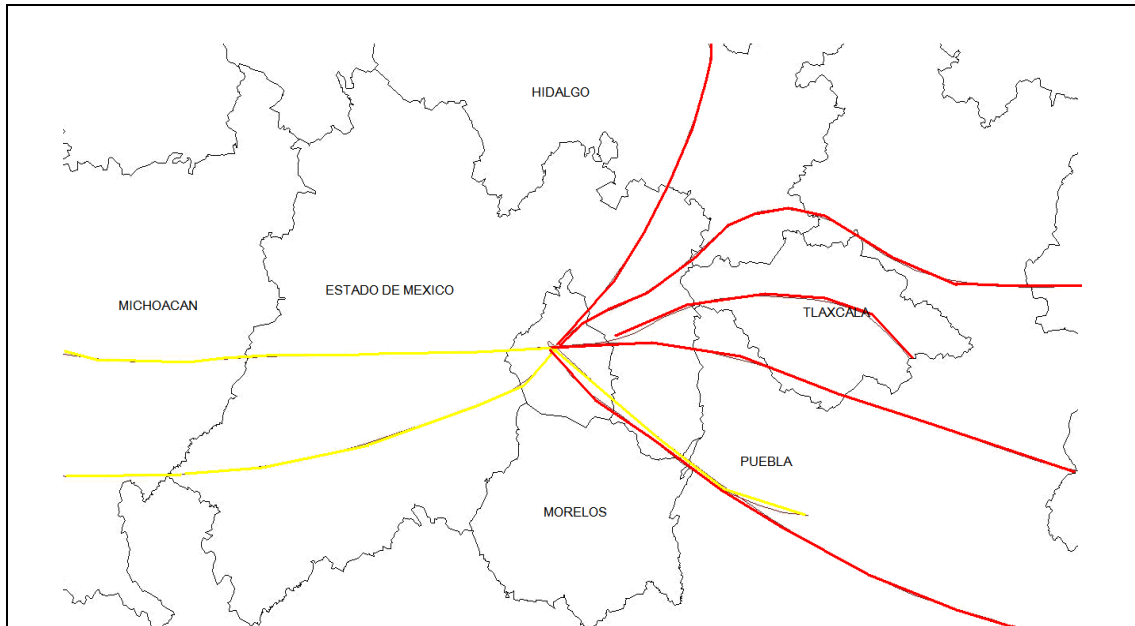


Figura 6.7 Trayectorias de los eventos de lluvia ácida en la ZMCM. Año 2007

Se observa que la mayoría de las trayectorias las parcelas de aire provienen del Golfo (70%), las cuales atraviesan por los Estados de Puebla y Tlaxcala, otras provienen del Pacífico (20%) y algunas de la región Noreste del Estado de México (10%).

En aquellas trayectorias que provienen del Pacífico, éstas atraviesan los Estados de Guerrero y Morelos. También es importante mencionar, el paso de las parcelas de viento por el Estado de Hidalgo y la contribución de precursores generada por la refinería de Tula, Hidalgo (Figura 6.3).

EL modelo HYSPLIT trabaja con una resolución de aproximadamente 110 Km, por lo cual no se distinguió con precisión el transporte local en esta región. Sin embargo, si se puede observar la contribución de las emisiones del volcán Popocatepetl, a estas masas de humedad. Esta información podría confirmarse utilizando datos puntuales de las emisiones del volcán y cruzar la información con los días en que se presentaron los eventos de lluvia ácida.

El modelo HYSPLIT no considera la topografía del lugar y la reacción química en la atmósfera. Para el caso de la altitud de la ZMCM, la altura de las trayectorias fue muy elevada, por lo que no se consideró el relieve de la misma, por ende las trayectorias obtenidas se encuentran fuera de la capa límite.

En este modelo sólo se pudo apreciar el origen de la humedad que genera propiamente la lluvia. Por lo anterior es complicado o poco probable que estas trayectorias demuestren que, durante el recorrido se hayan incorporado los precursores. Sin embargo, si se pueden observar las trayectorias de las emisiones del volcán Popocatepetl.

Para poder establecer mediante trayectorias, cual es el origen de los precursores para la ZMCM, se requiere de un modelo mas fino y trayectorias a diferentes niveles de altitud que muestren tanto el viento en superficie (correspondiente al transporte de precursores) y en niveles más altos (correspondientes al origen de la humedad).

**CAPÍTULO 7**  
**CONCLUSIONES Y**  
**RECOMENDACIONES**

## CAPÍTULO 7

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 7.1 CONCLUSIONES

Se evaluaron las características fisicoquímicas de la precipitación pluvial durante el periodo de 2003 a 2009, en la Zona Metropolitana de la Ciudad México (ZMCM). Se observó la presencia de lluvia ácida durante siete años consecutivos. Identificando a la región Suroeste como la región más afectada. La región Suroeste, presentó un valor promedio de pH ponderado en seis años (2003 -2009) de 4.41 y un valor máximo anual ponderado de seis años (2003 – 2009) de 5.21. Mientras que la estación de fondo, ubicada en la zona Noreste (viento arriba) presentó un valor de 6.28.

Se cuantificaron los principales aniones y cationes presentes en la precipitación pluvial, de acuerdo a la composición química de la lluvia y la abundancia relativa de los iones determinados, se sugiere que la acidez de las muestras se debe principalmente a la formación de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . El anión más abundante determinado en las muestras de lluvia fue  $\text{SO}_4^{2-}$ , el cual representó el 50% de todos los aniones, seguido por las concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  (40%) y el  $\text{Cl}^-$  (10%).

La concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$  ( $\mu\text{Eq/L}$ ) determinada en las muestras de lluvia, alcanzó valores máximos en la región Norte. Debido a su concentración por los bajos volúmenes de lluvia. Sin embargo, la distribución



de estos iones, en kilogramos por hectárea, es mayor en las estaciones ubicadas en la región Suroeste. Lo anterior sugiere que las concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$  fueron transportadas de la Zona Norte a la Zona Suroeste, como sus precursores, considerando que la dirección de los vientos predominantes en la ZMCM es de Norte a Sur.

Se comparó la tendencia de la acidez en las muestras de depósito húmedo con respecto a las emisiones de  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$  antropogénicos, no se observó relación. Sin embargo se observó que las tendencias de las emisiones del volcán Popocatepetl son similares a la acidez determinada en la muestras de lluvia, por lo que, se atribuye la fuerte contribución de esta fuente natural a la generación de lluvia ácida en la ZMCM.

Con respecto a las correlaciones iónicas, se identificaron tres posibles orígenes de los componentes del depósito húmedo: el origen ácido, el origen marino y el enriquecimiento por aerosoles provenientes del suelo, siendo mayoritario el origen ácido en la región Suroeste. La asociación de los iones  $\text{SO}_4^{2-}$  con respecto a los iones  $\text{H}^+$  mostró un máximo de 30% para la zona Suroeste y un 10% para las otras áreas. Con respecto a la neutralización con partículas y aerosoles provenientes del suelo, la contribución del ion sulfato, constituyó alrededor del 60%

Se elaboraron trayectorias de retroceso con la finalidad de localizar las zonas de fuentes de emisión de precursores de lluvia ácida. Las trayectorias obtenidas, sugieren que la humedad que originó los eventos de lluvia, provienen en su mayoría del Golfo de México, el resto del Pacífico, lo cual explica, la presencia de iones de origen marino;

Las trayectorias que atraviesan los Estados de Puebla, Tlaxcala y la región Norte del Estado de México; ayudan a comprender la incorporación de precursores emitidos por el volcán Popocatepetl, el arrastre eólico de suelo proveniente de Ecatepec, y la contribución de precursores generada por la refinería de Tula, Hidalgo.

Para el caso de la altitud de la ZMCM, la altura de las trayectorias fue muy elevada, por ende las trayectorias obtenidas se encuentran fuera de la capa límite, por lo cual no se distinguió con precisión el transporte local en esta región. Sin embargo, si se puede observar la contribución de las emisiones del volcán Popocatepetl a estas masas de humedad. Dicha información puede confirmarse utilizando datos puntuales de las emisiones del volcán y cruzarse con la información de los días en que se presentaron los eventos de lluvia ácida.

Para poder establecer mediante trayectorias, cual es el origen de los precursores para la ZMCM, se requiere de un modelo mas fino y trayectorias a diferentes niveles de altitud que muestren tanto el viento en superficie (correspondiente al transporte de precursores) y en niveles más altos (correspondientes al origen de la humedad).

## 7.2 RECOMENDACIONES

Para poder establecer mediante trayectorias, cual es el origen de los precursores para la ZMCM, se requiere de un modelo mas fino y trayectorias a diferentes niveles de altitud que muestren tanto el viento en superficie (correspondiente al transporte de precursores) y en niveles más altos (correspondientes al origen de la humedad).

Se recomienda la aplicación de otros modelos de trayectoria más sensibles, que involucren: reacción química, para poder introducir datos de concentración de los precursores; relieve de la zona de estudio, para considerar la resolución espacial y regional, así como, la alimentación al modelo con datos NARR (Norte American Regional Reanalysis), para la obtención de medias mensuales de vientos dominantes, ya que éstos cuentan con una resolución de 32Km y 29 niveles en la vertical.

Se recomienda establecer medidas preventivas y contribuir a la minimización y control de los precursores de la lluvia ácida sobre las fuentes específicas.

Se recomienda ampliar el estudio, considerando el depósito seco y su especiación, considerando su contribución a la alcalinización de la lluvia.

Con respecto a las estaciones de monitoreo, se recomienda cambiar la ubicación especificada para la estación LOM, la cual se encuentra actualmente dentro de la región Suroeste y cuyo comportamiento de datos es semejante a las estaciones ubicadas en la región Noroeste.

Se recomienda establecer un estudio de cargas críticas para ecosistemas de de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Se recomienda el establecimiento de una Red de Muestreo de Depósito Húmedo y Seco a nivel Nacional, que cuente con un laboratorio Control Central, para la identificación, minimización y control de las regiones que contribuyen mayoritariamente a la emisión de precursores.

Se recomienda que los países latinoamericanos sigan estrictos protocolos de muestreo y análisis de lluvia, con el fin de obtener resultados para ser comparados a nivel Nacional e Internacional.

**CAPÍTULO 8**  
**BIBLIOGRAFÍA**

## CAPÍTULO 8

### BIBLIOGRAFÍA

Álamo E., Rodríguez P., Abril (1998) "Lluvia ácida", Revista del Sur - Red del Tercer Mundo, Secretaría para América Latina, Uruguay, No. 78.

Baez, et. al, (1997). Chemical composition of precipitation at two sampling sites in Mexico: A 7-years study. Atmospheric Environment. Vol. 31, No. 6, pp. 915-925.

Baulch, D. L., Cox, R. A., Crutzen, P.J., Hampson, R.F., Jr., Kerr, F.A., Troe, J., Watson, R.P. (1982). Evaluated kinetic and photochemical data for atmospheric chemistry: Supplement 1. CODATA Task Group on Chemical Kinetic, J. Phys. Chem. Ref. Data, 11: 327-496.

Botello V. A., Rendón J. O., Gold B. G., Hernández A. C., (2005) "Golfo de México Contaminación e Impacto Ambiental diagnósticos y tendencias", 2da edición, U. A. de Campeche, UNAM., INE ., SEMANART, U. Juárez A. de Tabasco, U. I. A., G. del Edo. de Ver., COEPA, H Ayuntamiento de Coatzacoalcos, Veracruz.

Bravo, H., (1964). Colección de lluvia en Puerto Vallarta, Jalisco, México. Informe Técnico. Universidad Nacional Autónoma de México

Bravo, H., R. Sosa, P. Sánchez, and M. Jaimes. (2000). Potential urban ozone pollution as a product of a inadequate implementation of a best available control technology in developing countries. Proceedings of 93rd Annual Meeting of the Air & Waste Management Association. Salt Lake City, Utah, USA.

Bravo A. H., Sosa E. R., Sánchez A. P., Alarcón J. A. L., Jaime P. M., Hernández N. P., Retama M. A., Gómez R. C., Soto A. R., Kahl J. D., Bueno L. E., (2004)

“Evaluación de la contaminación atmosférica en el sur del Golfo de México. Campaña oceanográfica SGM-08 Universidad Nacional Autónoma de México.

Bravo A. H., Sosa E. R., Torres J. E., (1991) “Ozono y lluvia ácida en la ciudad de México”, Revista Ciencias No. 22, Pp. 33.

Bravo A. H., Soto A. R., Sosa E. R., Sánchez A. P., Alarcón J. A. L., Kahl J., Ruiz B. J., (2006) “Effect of Acid Rain on Building Material of the El Tajín Archaeological Zone, in Veracruz, Mexico”. Environmental Pollution. Vol. 144.

Casas C. Ma. C., Alarcón J. M., (1999) “Meteorología y Clima”, Universidad Politécnica de Catalunya S. L., Edición UPC, Diciembre, Pp. 28-29.

Castillo R. F., Roldan R. Ma. D., Blasco P. R., Huertas R. Ma. J., Caballero D. F. J., Moreno V. C., Luque R., Martínez M., 2005 “Biotecnología Ambiental”, Editorial Tébar, S. L., Madrid, Pp. 245.

Cervantes S. A., Rivera G. P., de la Paz L. J. M., 2004, “Estadística Práctica para el Análisis de Datos”, SPSS. Una herramienta para el análisis estadístico de datos. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, Academia De Estadística Y Computo Científico, Cap. 2.

Charlson y Rodhle, (1981) Groff et al., 2001, Okuda et. al., 2005. Influencia de los volcanes en las concentraciones de SO<sub>2</sub>.

Chen, W-H., (2001), Dynamics of sulfur dioxide absorption in a raindrop falling at terminal velocity. Atmos. Environ. 35(2001) 4777–4790.

Devore L. J., (2001) “Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias”, 5ta edición, Editorial Thomson Learning, Mexico D. F., Pp. 41-43.

Doménech, X., (2006) “Química ambiental de sistemas terrestres”. Editorial Reverté. Barcelona 2006. Pp. 32.

Freedman B., (1989). "Environmental Ecology, Second Edition: The Ecological Effects of Pollution, Disturbance, and Other Stresses".

Finlayson-Pitts J.B., Pitts, N.J., (1986). "Atmospheric Chemistry: fundamentals and experimental techniques". 1st. Ed. John Wiley & Sons., chap. 11, 12 y 13.

Gallardo T. A., García G. L., (1999), Lluvia acida, Gobierno del D. F., Secretaria del Medio Ambiente, Dirección Gral. De Prevención y Control de la Contaminación, Red Automático de Monitoreo Atmosférico, Junio. ([www.sma.df.gob.mx/simat/pdf/folletolluvia.pdf](http://www.sma.df.gob.mx/simat/pdf/folletolluvia.pdf))

Galloway, J.N., Keene, W.C., Likens, G.E. (1996). Processes controlling the composition of precipitation at a remote southern hemisphere location: Torres de Paine National Park, Chile. *Journal of Geophysical Research*, 101: 6383-6897.

Gilliespie J. R., Beltrán A., 1990 "Química", Editorial reverté S. A., España, Barcelona, Pp. 64.

Glynn H. J., Heinke W. G., (1999) "Ingeniería Ambiental", Cap. III, Prentice Hall, México, P.p. 162.

Grosjean, D., (1984). Gas-phase chemistry of organo-sulfur compounds, Conference on gas-liquid chemistry of natural waters, Brookhaven National Laboratory, Upton, NY, April.

Harris C. D., (2007) "Análisis químico cuantitativo", 3ª edición, Editorial Reverte, España, Pp. 236.

Hein M., Arena S., (2001), "Fundamentos de Química", 10ma Edición, Editorial Thomson Learning, México D. F., Pp. 384-385.

Hutchinson, T.C. (1978). Effects of acid precipitation of terrestrial ecosystems. Plenum press. New York.



Krupa, S.V., (2002) "Sampling and physico-chemical analysis of precipitation: a review". *Environmental Pollution* 120, 565-594.

Lee, D.S. (1993). Spatial variability of urban precipitation chemistry and deposition: statistical associations between constituents and potential removal processes of precursor species. *Atmospheric Environmental*. 27B: 321-337.

Lee, B.K., Hong, S.H., Lee, D.S. (2000). Chemical composition of precipitation and wet deposition of major ions on the Korea Peninsula. *Atmospheric Environmental*. 34: 563 - 575.

Magaña, V., J. Pérez-Fernández, J. Méndez-Pérez. (2002). Diagnostic and prognostic of extreme precipitation events in the México basin, *Geofísica Internacional*, Vol. 41: 247-259.

Manahan E. S., (2007), "Introducción a la Química Ambiental", Universidad Nacional Autónoma de México, Editorial Reverte, México D. F., 1ª Ed. Pp. 409-410.

Manahan S., (1994). *Environmental Chemistry*, 4ª Edition University of Missouri, Lewis Publisher, Columbia. 1991. Pp. 286. [www.sagangea.org/hojared/Hoja13.htm](http://www.sagangea.org/hojared/Hoja13.htm), junio, 2007.

Martin A., Estimated washout coefficients for sulphur dioxide, nitric oxide, nitrogen dioxide and ozone. *Atmospheric Environmental* Vol 18 No. 9 pp 1955-1961.

Marques D. M. J., (2004), "Probabilidad y estadística para Ciencias Químico Biológicas", Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, 2da edición, México D. F. Pp. 191-206.

Marín H. A., (2009) "Evaluación, prevención y control de precursores de lluvia ácida en el Estado de Veracruz", Tesis programa de Maestría y Doctorado en

Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Departamento del Centro de Ciencias de la Atmosfera, UNAM, Pp. 55-64.

Martínez A. E., Díaz M Y., (2004) "Contaminación Atmosférica", Ciencia y técnica 45, Universidad de la Castilla-La Mancha, 1ª Ed. España, Pp. 26.

Martínez M. J. L., (2008) "Instrumentos Económicos para la Protección del medio Ambiente", DIKINSON S. L., Madrid, Pp. 40.

Masters G., Introduction to Environmental Engineering. Prentice Hall. 2<sup>nd</sup> Ed. New Jersey. pp 59 - 60.

Mersereau M., Anguish D., (2006), The Canada-Wide Acid Rain Strategy for Post- Strategy and Supporting Document Federal/Provincial/Territorial Ministers of Energy and Environment (Canada) Halifax, Nova Scotia October 19, 1998.  
Moller R., Transporte urbano y desarrollo sostenible en América latina, Universidad del Valle, Santiago Colombia, Abril, Pp. 211.

NADP National Atmospheric Deposition Program/ National Trends Network.(2004) [www.nadp.sws.uiuc.edu](http://www.nadp.sws.uiuc.edu).

Parungo F., Nagamoto C., Heyts S., Bravo A.H., (1990), The investigation of Air Quality and Acid rain over The Golfo of México. Atmospheric Environmental. Vol. 124 A (1). Pág. 109-123.

Ruiz O. P. A., Benavides B. H. O., (2007), "Lluvia Ácida", Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM, Lluvia Acida, Nota Técnica, pp. 3-7.

Secretaría del Medio Ambiente (SMA). (2007), Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM).

Secretaría del Medio Ambiente (SMA). (2009). Calidad del aire en la Ciudad de México. Informe.

Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México., (SIMAT). Para la zona Metropolitana de la Ciudad de México, (2002), Publicaciones referentes al tema de calidad del aire.

Spedding J. D., (1981) "Contaminación Atmosférica", Dióxido de azufre, Capítulo 5, Editorial Reverte, España, Pp. 35.

Stockwell, W. R., (1986), 'A homogeneous gas phase mechanism for use in a regional acid deposition model'. Atmos. Environ. 20, 1615–1632.

Schwartz E. (1989). "Acid deposition, unraveling a regional phenomenon. Science". 243: 753-763.

Torres G. F. A., (2009), "Efecto de la lluvia acida en materiales pétreos del patrimonio histórico del Estado de Campeche", Tesis, Universidad Autónoma de Campeche, Facultad de Ingeniería, Centro de investigación en Corrosión.

Taylor, J. A. and Lloyd, J., (1992), 'Sources and Sinks of Atmospheric CO<sub>2</sub>', Aust. Journal of. Botanic. 40, pp 407–418..

US. EPA. "Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems", V-5 Precipitation Measurement Systems .EPA – 600/R-94/038e US Environmental Protection Agency., Research Triangle Park, NC.

US, EPA. Appendix I. "Effect of acid rain on human Health and selected ecosystems and Anticipated Recovery Benefits in Acid rain". Emissions Trends and effects in the Easter United States, US. General Accounting Office, march 2000 (<http://www. Gao.gov/archive/2000>).

Velasco S. H. E.; (2002), "Lluvia ácida en los bosques del poniente del valle de México", XXVIII Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental (CENICA) del Instituto Nacional de Ecología (INE), Cancún México, 27 al 31 de octubre.

**ANEXO 1**

**DATOS DE CONCENTRACION  
PONDERADA POR AÑO**

LLUVIA ÁCIDA EN LA ZMCM. EVALUACIÓN Y TRASCENDENCIA. ANEXO I

CLAVE	Mes	AÑO	vol. lluvia (mm)	POND.COND	PH POND	CONCENTRACION PONDERADA $\mu$ Eq/L							
						Na+	NH4-	K+	Mg2+	Ca+	[CL-]	[NO3-]	[SO4=]
CHA	mayo	2004	184.52	5.63	6.71	0.62	28.00	1.34	4.31	14.59	1.53	9.68	18.38
CHA	mayo	2005	19.80	2.68	7.76	1.97	10.06	0.74	0.88	4.31	1.43	3.41	6.07
CHA	mayo	2006	40.80	32.01	5.31	3.86	176.82	2.90	7.18	59.65	15.97	72.40	140.94
CHA	mayo	2007	57.70	28.59	5.83	8.72	117.55	5.08	11.53	73.24	12.13	84.55	126.30
CHA	mayo	2008	16.00	46.44	5.98	34.15	219.67	15.95	72.60	28.15	35.62	101.16	213.19
CHA	junio	2003	334.57	6.20	6.35	3.75	42.53	1.00	2.01	9.24	4.96	10.92	15.77
CHA	junio	2004	158.40	21.86	6.98	1.75	70.53	1.31	4.21	26.14	5.51	7.76	23.97
CHA	junio	2005	58.60	15.25	6.82	0.00	110.71	0.58	3.08	18.56	2.52	21.58	41.21
CHA	junio	2006	62.20	18.44	5.68	0.55	127.44	1.69	4.26	28.67	25.60	46.48	71.16
CHA	junio	2007	127.10	27.82	5.43	6.70	108.85	4.35	7.41	74.62	15.27	56.85	115.56
CHA	junio	2008	112.30	29.86	4.74	6.68	90.55	4.17	8.94	31.98	14.07	73.41	63.46
CHA	junio	2009	153.60	57.70	5.69	22.65	187.89	6.33	50.09	139.51	20.28	130.29	165.42
CHA	julio	2003	17.20	23.06	7.14	6.65	103.54	2.86	12.66	42.74	16.40	28.66	80.24
CHA	julio	2004	47.90	18.96	6.68	1.51	141.78	3.45	11.09	53.07	17.68	42.20	56.90
CHA	julio	2005	97.90	15.13	6.66	7.27	81.48	3.94	3.73	22.23	4.26	26.92	44.86
CHA	julio	2006	83.40	12.82	6.51	6.88	71.60	6.45	4.69	35.91	13.19	31.33	52.38
CHA	julio	2007	126.20	22.69	5.55	12.08	95.95	19.56	19.41	48.78	10.44	63.18	101.83
CHA	julio	2008	82.20	14.84	6.11	4.95	68.77	3.85	7.60	31.29	11.26	47.52	48.09
CHA	julio	2009	70.80	19.62	6.28	9.06	47.26	8.36	30.02	44.97	2.30	48.68	43.47
CHA	agosto	2003	92.00	15.71	6.93	17.41	56.50	1.24	32.06	53.89	1.14	24.74	36.84
CHA	agosto	2004	38.60	17.24	6.22	0.11	107.10	0.10	0.33	41.15	2.61	24.39	38.14
CHA	agosto	2005	113.60	12.12	6.73	1.49	118.34	2.33	3.08	14.39	7.07	40.31	51.52
CHA	agosto	2006	21.00	17.82	4.04	0.43	22.78	1.02	3.29	23.00	9.60	12.30	26.25
CHA	agosto	2007	113.10	10.31	6.22	1.29	67.80	1.04	3.06	14.25	4.62	23.09	29.98
CHA	agosto	2008	40.00	23.58	6.02	6.12	79.12	8.24	15.47	31.22	12.11	44.00	69.03
CHA	agosto	2009	91.90	20.03	6.37	5.47	56.53	2.94	26.58	50.97	5.34	37.99	52.56
CHA	septiembre	2003	85.50	15.12	6.90	22.47	52.30	2.47	7.07	41.29	3.51	22.43	47.15
CHA	septiembre	2004	63.80	15.23	6.73	0.13	83.75	5.30	17.04	17.61	0.20	14.27	20.62
CHA	septiembre	2005	2.80	35.80	5.28	41.19	1378.00	65.65	89.64	390.00	5.65	397.02	641.13
CHA	septiembre	2006	80.10	9.08	6.37	0.70	34.94	1.30	0.85	22.37	6.21	17.81	45.30
CHA	septiembre	2007	82.50	13.18	5.09	6.38	137.72	3.62	7.71	50.26	3.75	51.33	86.95
CHA	septiembre	2008	67.80	18.41	5.60	4.45	58.84	6.37	12.26	23.21	7.27	30.59	50.04
CHA	septiembre	2009	29.00	16.34	6.50	0.00	90.00	0.00	0.00	3.00	2.82	27.74	27.92
CHA	octubre	2003	25.40	20.71	6.83	23.18	140.25	1.88	3.67	54.68	42.59	64.22	50.72
CHA	octubre	2004	15.10	34.34	5.39	0.33	142.84	0.19	0.63	87.28	9.16	15.62	36.27
CHA	octubre	2005	53.60	12.12	6.29	0.99	30.46	2.83	2.95	3.90	2.79	27.72	44.41
CHA	octubre	2006	5.10	18.49	6.71	0.43	66.67	4.60	13.17	26.50	21.47	52.90	85.42
CHA	octubre	2007	31.30	22.13	5.29	4.49	192.76	10.36	10.24	87.21	13.40	165.41	173.46
CHA	octubre	2008	18.80	20.60	6.53	5.38	69.51	7.36	13.81	27.43	4.80	33.87	55.63
CHA	octubre	2009	42.60	15.39	5.52	1.66	78.03	0.46	6.09	15.40	5.91	40.04	40.36

LLUVIA ÁCIDA EN LA ZMCM. EVALUACIÓN Y TRASCENDENCIA. ANEXO I

CLAVE	Mes	AÑO	vol. lluvia (mm)	POND.COND	PH POND	CONCENTRACION PONDERADA $\mu$ Eq/L							
						Na+	NH4-	K+	Mg2+	Ca+	[CL-]	[NO3-]	[SO4=]
NTS	mayo	2004	15.90	67.80	6.70	13.82	283.32	22.92	73.76	140.39	24.23	102.66	130.52
NTS	mayo	2005	21.50	39.40	6.88	28.70	137.78	11.76	27.16	86.50	20.62	63.06	77.08
NTS	mayo	2006	50.30	30.87	5.79	6.33	178.56	2.61	5.01	38.95	14.99	56.58	121.61
NTS	mayo	2007	23.40	60.49	6.88	22.40	232.14	12.23	22.59	142.10	29.63	147.39	212.99
NTS	mayo	2008	32.02	106.93	6.62	84.58	334.79	42.95	94.29	204.86	72.28	264.25	386.98
NTS	mayo	2009	25.10	51.57	6.82	12.50	227.55	7.07	17.02	125.53	12.33	106.86	147.81
NTS	junio	2004	198.00	16.53	6.24	7.47	93.16	5.77	18.56	36.38	11.25	25.51	44.45
NTS	junio	2005	76.10	29.88	6.61	0.00	182.54	1.52	5.67	45.57	12.69	50.79	77.84
NTS	junio	2006	94.60	23.61	5.14	0.12	130.67	1.50	3.07	42.82	21.44	53.73	73.69
NTS	junio	2007	161.20	31.26	4.83	6.50	105.29	5.59	8.47	59.23	13.42	91.40	91.49
NTS	junio	2008	188.60	30.54	4.76	7.48	83.64	5.22	8.52	33.28	16.02	68.18	63.71
NTS	junio	2009	138.20	19.70	5.89	7.83	46.74	0.94	5.93	60.15	7.23	40.46	56.44
NTS	junio	2003	115.60	19.14	6.98	7.09	102.25	2.07	8.76	45.70	41.99	34.52	65.52
NTS	julio	2004	77.00	19.42	6.64	2.36	94.21	3.91	12.58	39.69	9.11	41.00	56.86
NTS	julio	2005	80.50	18.77	6.62	4.28	84.55	2.61	2.97	30.42	9.82	29.66	58.55
NTS	julio	2006	162.60	20.25	5.69	40.25	104.23	17.06	27.41	50.76	18.54	29.49	66.35
NTS	julio	2007	94.00	22.16	5.99	1.85	71.74	2.69	7.03	40.22	7.18	58.15	89.19
NTS	julio	2008	124.60	16.98	6.78	5.98	77.28	4.54	6.21	34.17	11.17	33.57	46.34
NTS	julio	2009	43.00	22.60	6.56	12.47	79.24	0.29	21.82	54.99	5.74	48.93	48.63
NTS	julio	2003	162.10	27.37	6.98	14.30	114.71	2.71	15.46	65.13	41.55	30.60	63.45
NTS	agosto	2003	87.00	24.34	7.03	17.31	73.03	1.56	58.36	78.96	2.96	30.36	60.44
NTS	agosto	2004	76.50	21.45	6.89	0.63	70.43	5.55	17.85	59.07	7.42	19.90	39.39
NTS	agosto	2005	133.40	14.50	6.20	0.90	106.85	0.67	3.42	22.33	3.21	22.46	44.24
NTS	agosto	2006	85.70	23.02	5.73	2.05	117.73	5.57	14.75	74.28	29.30	46.80	82.26
NTS	agosto	2007	115.80	12.95	6.01	4.68	95.55	3.75	4.12	25.10	7.25	23.34	17.49
NTS	agosto	2008	99.60	20.82	6.01	5.61	72.47	7.19	13.49	28.59	9.36	37.98	56.32
NTS	agosto	2009	88.40	21.55	5.46	12.71	65.18	4.39	31.42	29.51	12.71	45.93	62.18
NTS	septiembre	2004	87.10	19.99	6.39	10.77	71.21	5.95	19.16	33.51	5.15	27.37	40.06
NTS	septiembre	2005	29.10	19.36	6.38	9.64	76.51	2.29	3.49	32.81	14.02	34.98	60.31
NTS	septiembre	2006	67.50	22.17	5.03	2.13	75.84	1.07	1.62	31.31	4.75	30.34	63.40
NTS	septiembre	2007	85.60	16.87	6.15	3.02	152.31	1.88	6.21	45.83	13.99	41.79	68.67
NTS	septiembre	2008	186.10	22.37	5.47	5.73	75.47	7.52	14.11	29.77	7.61	49.80	53.57
NTS	septiembre	2009	86.40	26.07	4.88	1.40	84.00	1.38	7.26	17.98	7.77	39.65	71.39
NTS	septiembre	2003	112.50	20.98	6.25	21.82	45.28	3.51	25.21	42.30	38.69	20.38	85.77
NTS	octubre	2003	83.20	23.22	6.43	13.26	106.06	3.23	20.35	47.59	29.89	60.76	69.10
NTS	octubre	2004	47.40	26.84	5.41	0.31	129.19	0.26	0.82	121.59	2.08	20.09	31.05
NTS	octubre	2005	70.20	10.16	5.94	1.45	28.79	1.63	7.74	5.15	0.00	20.27	31.35
NTS	octubre	2006	7.30	32.00	5.60	11.74	60.00	1.53	9.88	34.00	24.01	7.90	67.92
NTS	octubre	2007	24.60	12.89	6.41	3.86	122.99	6.05	6.07	51.98	12.85	117.26	105.79
NTS	octubre	2008	14.90	19.00	6.23	4.02	51.96	7.10	13.34	20.50	7.06	27.58	40.83
NTS	octubre	2009	58.50	11.86	6.20	3.34	94.97	0.30	4.06	15.44	3.02	34.87	63.45

LLUVIA ÁCIDA EN LA ZMCM. EVALUACIÓN Y TRASCENDENCIA. ANEXO I

CLAVE	Mes	AÑO	vol. lluvia (mm)	POND.COND	PH POND	CONCENTRACION PONDERADA $\mu$ Eq/L							
						Na+	NH4-	K+	Mg2+	Ca+	[CL-]	[NO3-]	[SO4=]
TEC	mayo	2004	55.50	28.71	6.60	2.30	209.36	7.41	23.84	113.69	14.48	71.01	96.94
TEC	mayo	2005	11.00	68.60	7.03	131.65	34.28	1.17	366.75	13.40	22.60	151.00	212.50
TEC	mayo	2006	59.60	31.33	5.48	2.25	164.63	1.10	5.11	48.00	12.27	77.57	130.07
TEC	mayo	2007	54.70	50.00	6.04	22.89	155.04	9.28	21.60	152.42	89.24	127.21	151.39
TEC	mayo	2008	34.80	155.34	6.67	116.28	668.91	49.01	164.67	350.12	73.30	337.92	620.74
TEC	mayo	2009	34.80	50.65	6.97	11.46	213.31	7.14	15.71	137.11	9.72	103.27	149.77
TEC	junio	2004	210.10	20.29	6.66	1.70	88.83	0.82	2.62	43.18	5.17	36.32	47.40
TEC	junio	2005	52.30	19.54	6.60	0.00	90.48	0.16	1.74	22.29	5.10	18.68	53.67
TEC	junio	2006	67.10	31.16	6.25	24.95	149.68	7.39	6.82	74.65	27.25	69.48	117.43
TEC	junio	2007	168.10	29.44	4.59	5.18	88.59	4.52	6.88	62.32	10.55	70.63	100.82
TEC	junio	2008	190.30	30.33	5.24	8.34	102.19	5.67	19.84	45.11	15.51	74.12	89.18
TEC	junio	2009	100.70	22.14	5.90	9.20	51.66	0.99	13.41	75.67	9.20	47.65	74.46
TEC	julio	2003	149.00	17.66	6.72	8.72	122.79	2.39	4.66	49.59	25.68	41.09	127.41
TEC	julio	2004	79.60	20.91	6.64	2.70	120.81	2.60	8.37	52.91	15.25	48.22	51.94
TEC	julio	2005	83.30	22.03	6.69	1.00	153.56	3.38	5.96	50.58	6.29	33.97	58.30
TEC	julio	2006	153.90	17.59	6.32	2.17	72.81	3.02	13.21	65.55	26.02	41.92	72.88
TEC	julio	2007	166.20	23.88	5.94	9.51	60.84	1.92	5.42	27.94	7.29	26.23	50.23
TEC	julio	2008	109.80	15.88	6.08	2.76	55.22	4.35	6.26	24.96	10.76	32.73	42.64
TEC	julio	2009	59.00	25.16	6.54	14.87	68.73	5.99	29.03	78.23	9.84	56.62	62.19
TEC	julio	2003	149.10	19.54	6.86	15.84	93.46	0.92	5.24	53.75	21.82	44.06	58.35
TEC	agosto	2004	108.50	19.38	6.76	0.43	88.12	1.86	5.98	62.36	0.87	20.76	19.56
TEC	agosto	2005	133.20	16.77	6.62	1.38	98.85	2.53	16.23	33.74	6.78	29.03	58.15
TEC	agosto	2006	116.20	20.35	5.91	1.76	74.10	0.83	2.27	82.94	38.89	42.64	80.39
TEC	agosto	2007	119.60	15.05	6.33	2.03	89.40	6.18	47.86	42.62	5.02	17.78	49.26
TEC	agosto	2008	177.90	26.21	5.63	8.96	115.73	8.34	15.65	45.65	16.31	77.25	92.08
TEC	agosto	2009	105.20	21.28	6.31	7.58	61.46	3.68	27.69	44.22	7.58	40.48	56.82
TEC	agosto	2003	128.50	26.83	6.88	17.35	69.57	2.21	75.19	69.22	9.97	40.78	60.35
TEC	septiembre	2003	136.30	23.92	6.60	57.92	89.67	5.70	72.90	102.89	8.06	37.04	49.28
TEC	septiembre	2004	170.80	19.09	5.55	0.26	103.85	5.11	16.45	48.69	12.05	18.07	24.17
TEC	septiembre	2005	42.60	19.23	5.64	1.60	73.55	0.52	1.50	16.28	9.77	30.99	51.46
TEC	septiembre	2006	95.60	33.55	4.18	0.98	74.11	0.54	2.40	35.34	11.62	38.17	50.52
TEC	septiembre	2007	111.30	16.25	5.85	3.69	113.62	2.18	8.97	26.87	5.08	47.69	60.35
TEC	septiembre	2008	45.30	24.36	5.68	6.46	83.46	9.72	18.24	32.93	12.98	54.66	55.89
TEC	septiembre	2009	99.70	27.72	4.71	0.13	71.20	0.00	3.15	25.23	5.96	40.07	69.98
TEC	octubre	2003	57.80	40.96	6.96	13.97	122.36	4.47	16.02	51.04	11.30	15.26	89.27
TEC	octubre	2004	60.80	38.21	4.85	221.09	10.99	0.26	0.82	145.41	16.06	44.64	66.52
TEC	octubre	2005	120.80	17.28	5.14	1.60	69.83	2.21	5.21	26.71	8.59	29.60	55.13
TEC	octubre	2006	21.50	73.61	5.86	0.43	73.33	4.09	8.23	15.00	1.98	19.35	22.71
TEC	octubre	2007	32.60	37.75	7.59	5.29	11.77	12.26	23.75	154.89	14.90	106.33	18.41
TEC	octubre	2008	21.00	25.00	7.05	8.76	113.26	7.90	14.83	44.69	6.78	45.32	69.58
TEC	octubre	2009	88.00	25.16	6.54	14.87	68.73	5.99	29.03	78.23	9.84	56.62	62.19
TEC	noviembre	2004	6.90	35.07	7.14	0.43	179.44	0.26	0.82	231.00	0.28	26.29	49.79

LLUVIA ÁCIDA EN LA ZMCM. EVALUACIÓN Y TRASCENDENCIA. ANEXO I

CLAVE	Mes	AÑO	vol. lluvia (mm)	POND.COND	PH POND	CONCENTRACION PONDERADA □ Eq/L							
						Na+	NH4-	K+	Mg2+	Ca+	[CL-]	[NO3-]	[SO4=]
XAL	mayo	2004	17.50	47.81	6.99	11.14	231.56	13.47	43.36	341.24	24.12	66.03	141.98
XAL	mayo	2005	8.00	89.40	7.24	21.30	220.56	18.67	26.34	288.00	45.20	144.03	232.29
XAL	mayo	2006	69.40	28.24	5.51	2.38	172.97	1.92	8.02	52.10	13.25	76.44	127.25
XAL	mayo	2007	45.40	51.56	6.44	29.30	146.49	11.57	20.45	182.71	24.79	114.53	185.64
XAL	mayo	2008	8.50	51.62	5.62	17.47	204.47	6.83	22.05	112.74	41.63	101.57	212.13
XAL	mayo	2009	20.80	73.51	7.21	22.38	262.69	10.86	20.36	207.35	20.07	126.88	216.58
XAL	junio	2003	187.50	18.72	6.60	9.68	104.80	1.66	3.09	44.31	13.71	30.51	51.91
XAL	junio	2004	183.30	22.73	6.39	1.84	60.06	4.30	13.85	59.66	5.80	35.71	46.43
XAL	junio	2005	57.60	28.51	6.83	0.13	129.60	2.13	5.59	45.26	10.58	39.65	65.78
XAL	junio	2006	50.20	27.47	5.71	0.00	153.33	1.78	11.05	75.90	23.42	68.16	108.27
XAL	junio	2007	102.70	29.46	4.90	1.19	67.78	3.63	8.38	37.12	10.04	42.90	90.04
XAL	junio	2008	190.60	26.01	5.69	8.05	81.77	4.87	9.79	36.02	14.61	56.65	61.34
XAL	junio	2009	89.40	26.28	6.54	19.45	68.98	1.22	20.41	73.47	9.57	49.13	78.06
XAL	julio	2003	115.50	25.91	6.90	12.41	120.35	1.67	4.47	56.68	12.04	34.78	54.14
XAL	julio	2004	64.70	24.71	6.82	2.37	105.20	3.63	11.69	45.92	12.53	52.54	63.41
XAL	julio	2005	81.40	25.13	6.68	1.73	114.59	1.74	4.93	58.49	4.87	40.95	82.18
XAL	julio	2006	117.40	19.38	6.48	4.48	102.07	6.21	15.25	62.61	27.28	43.67	62.11
XAL	julio	2007	152.70	21.57	5.80	14.78	75.78	4.43	28.20	40.73	10.40	40.20	91.07
XAL	julio	2008	92.80	17.70	6.28	3.11	60.56	4.52	6.50	31.55	10.57	42.91	40.47
XAL	julio	2009	52.80	27.32	6.72	9.87	59.58	0.97	24.89	52.39	6.35	41.86	54.33
XAL	agosto	2004	75.90	20.46	6.83	0.62	83.14	0.54	1.74	104.80	0.49	10.92	17.50
XAL	agosto	2005	105.00	17.66	6.53	2.12	96.68	1.97	3.00	49.70	7.91	37.56	55.29
XAL	agosto	2006	133.60	26.62	5.84	7.69	102.43	0.84	14.87	100.99	42.05	54.95	102.08
XAL	agosto	2007	112.30	11.56	6.73	4.58	63.33	3.38	5.91	46.85	6.37	21.51	37.65
XAL	agosto	2008	187.20	20.94	5.94	6.76	87.35	6.97	13.08	34.46	11.00	48.32	69.70
XAL	agosto	2009	112.90	21.74	6.58	8.71	54.49	3.63	26.11	61.13	8.71	38.17	52.04
XAL	agosto	2003	90.00	25.55	7.06	11.22	93.76	1.89	14.55	74.22	13.53	33.13	49.06
XAL	septiembre	2004	97.80	28.55	6.46	8.16	114.59	5.15	16.59	119.93	3.28	27.09	31.77
XAL	septiembre	2005	22.00	28.16	6.57	6.30	130.47	4.42	7.20	91.80	24.31	38.84	63.13
XAL	septiembre	2006	55.70	27.85	4.93	2.55	86.49	1.36	2.19	43.98	5.61	34.48	92.82
XAL	septiembre	2007	48.30	21.50	6.17	2.77	81.74	8.81	23.94	86.14	15.97	80.56	92.71
XAL	septiembre	2008	52.80	25.53	6.18	6.69	90.87	8.76	16.94	35.85	8.12	75.79	52.23
XAL	septiembre	2009	136.80	22.18	5.25	1.07	81.11	0.50	1.52	37.66	2.88	35.88	72.93
XAL	septiembre	2003	152.20	21.54	6.72	14.33	61.12	0.56	3.15	79.53	12.44	38.15	76.38
XAL	octubre	2004	100.70	19.42	5.72	0.37	104.73	0.68	2.18	104.31	7.24	14.81	35.70
XAL	octubre	2005	93.60	19.21	5.46	1.83	55.92	2.29	1.69	25.02	4.91	27.96	60.75
XAL	octubre	2006	10.00	44.00	6.42	0.43	66.67	4.35	4.94	14.00	5.37	44.52	63.33
XAL	octubre	2007	34.90	26.95	5.33	5.00	110.32	6.00	29.60	67.10	34.73	50.94	81.13
XAL	octubre	2008	34.10	24.10	6.82	6.60	85.31	8.53	16.02	33.66	5.65	33.39	62.92
XAL	octubre	2009	168.00	16.04	6.37	9.41	121.20	2.68	4.20	67.63	5.34	81.76	72.91
XAL	octubre	2003	64.60	22.83	7.12	7.57	143.28	2.61	76.31	52.76	30.10	18.20	31.62



LLUVIA ÁCIDA EN LA ZMCM. EVALUACIÓN Y TRASCENDENCIA. ANEXO I

CLAVE		AÑO	vol. lluvia (mm)	POND.COND	PH POND	CONCENTRACION PONDERADA $\mu$ Eq/L							
						Na+	NH4-	K+	Mg2+	Ca+	[CL-]	[NO3-]	[SO4=]
IBM	mayo	2004	41.70	40.35	5.55	5.34	240.28	12.22	39.32	102.53	8.35	53.62	68.47
IBM	mayo	2005	9.80	122.72	6.92	14.20	103.72	23.15	43.35	258.17	38.70	226.79	161.34
IBM	mayo	2006	54.40	27.05	4.79	2.72	145.85	1.36	4.05	34.57	6.22	73.96	131.11
IBM	mayo	2007	58.50	45.78	5.06	26.66	186.03	11.28	21.68	140.18	39.27	144.65	159.42
IBM	mayo	2008	23.70	37.28	6.39	10.66	137.73	7.17	13.45	54.34	15.93	102.07	96.17
IBM	mayo	2009	43.40	44.41	7.20	12.93	174.70	7.55	8.79	99.96	9.70	73.06	121.40
IBM	junio	2004	148.40	23.87	6.23	2.67	110.09	3.83	12.33	68.35	10.55	37.55	43.27
IBM	junio	2005	106.50	17.89	6.54	0.00	137.07	0.57	4.88	35.96	2.18	22.98	52.59
IBM	junio	2006	114.00	25.54	5.34	0.00	45.80	11.35	1.72	18.91	3.54	21.43	34.52
IBM	junio	2007	121.60	37.96	4.61	5.73	151.31	7.12	17.14	76.24	100.32	89.39	90.59
IBM	junio	2008	229.60	27.85	5.59	48.42	84.09	8.41	8.05	36.54	9.20	89.17	77.67
IBM	junio	2009	91.70	22.84	5.86	15.02	62.13	1.46	11.75	70.90	11.92	50.48	68.03
IBM	junio	2003	240.40	19.16	5.93	5.73	131.63	1.44	3.20	54.43	27.55	43.66	72.13
IBM	julio	2004	206.70	22.64	6.53	0.93	56.25	1.33	4.28	65.96	9.62	48.08	51.12
IBM	julio	2005	96.60	24.92	5.43	0.45	157.50	3.51	5.59	56.10	14.70	52.50	81.86
IBM	julio	2006	148.40	18.08	6.18	2.47	87.85	2.93	5.84	47.77	17.22	34.22	79.80
IBM	julio	2007	166.40	17.98	5.79	16.38	75.69	3.09	6.66	48.05	10.85	48.15	120.85
IBM	julio	2008	168.00	20.46	5.01	5.20	67.25	4.51	6.11	31.10	8.21	53.54	50.69
IBM	julio	2009	136.30	23.99	6.83	7.48	67.65	0.23	24.47	79.10	8.53	48.23	64.72
IBM	julio	2003	168.50	28.14	6.18	14.65	139.69	1.69	8.92	80.61	14.96	57.37	64.20
IBM	agosto	2004	164.00	21.37	5.81	0.29	105.63	1.53	4.92	55.22	0.14	17.42	23.36
IBM	agosto	2005	191.50	16.76	5.62	0.43	117.02	1.82	1.03	29.87	2.41	27.44	55.38
IBM	agosto	2006	262.10	18.95	5.70	7.37	99.21	2.59	2.87	61.43	10.53	32.65	74.74
IBM	agosto	2007	171.80	14.08	6.01	1.95	98.22	1.59	6.01	39.13	5.53	30.50	59.02
IBM	agosto	2008	221.20	21.73	5.30	6.83	115.62	7.94	14.90	45.61	12.06	110.45	63.81
IBM	agosto	2009	74.20	24.80	6.67	6.65	85.55	4.72	33.63	24.18	6.65	49.17	80.69
IBM	agosto	2003	158.80	19.33	6.65	17.70	76.12	3.45	43.56	68.52	3.55	32.31	43.38
IBM	septiembre	2004	182.60	21.26	5.99	27.44	64.71	2.52	8.12	55.66	3.53	19.02	34.36
IBM	septiembre	2005	68.00	18.11	6.31	4.35	131.93	0.88	5.62	44.72	15.55	25.52	73.51
IBM	septiembre	2006	67.00	26.08	4.90	2.14	110.45	1.50	2.37	59.37	10.34	32.87	66.69
IBM	septiembre	2007	159.50	15.50	6.28	1.74	131.25	1.31	4.65	34.52	6.07	24.36	47.78
IBM	septiembre	2008	127.70	26.26	5.23	6.77	87.50	9.17	17.21	34.52	6.90	59.12	73.28
IBM	septiembre	2009	91.70	29.24	4.64	1.93	78.95	0.86	0.59	29.10	4.95	56.02	71.54
IBM	septiembre	2003	252.90	17.53	5.45	50.77	163.08	5.71	48.77	79.26	151.39	64.80	70.62
IBM	octubre	2004	86.30	36.62	4.80	0.47	63.14	0.64	2.07	168.97	12.40	49.67	56.41
IBM	octubre	2005	124.30	17.91	5.19	2.03	70.61	0.34	4.91	31.32	6.16	44.96	59.14
IBM	octubre	2006	10.00	30.80	6.31	0.43	56.67	0.41	6.58	24.00	13.28	83.55	63.33
IBM	octubre	2007	52.40	20.44	5.17	68.31	237.44	110.13	85.93	129.99	39.98	214.07	235.94
IBM	octubre	2008	10.40	37.63	7.09	49.92	112.81	11.96	24.15	60.09	40.09	44.64	85.70
IBM	octubre	2009	110.10	22.03	4.83	2.34	91.33	0.81	0.99	23.07	5.01	78.52	62.89
IBM	octubre	2003	141.60	28.36	6.61	114.65	352.31	25.39	11.08	108.95	42.67	112.28	182.18

LLUVIA ÁCIDA EN LA ZMCM. EVALUACIÓN Y TRASCENDENCIA. ANEXO I

CLAVE		AÑO	vol. lluvia (mm)	POND.COND	PH POND	CONCENTRACION PONDERADA $\mu$ Eq/L							
						Na+	NH4-	K+	Mg2+	Ca+	[CL-]	[NO3-]	[SO4=]
LAA	mayo	2004	59.70	40.31	5.58	9.41	205.11	10.49	33.76	130.84	15.93	91.48	135.69
LAA	mayo	2005	53.00	50.59	6.71	13.13	220.88	25.78	28.11	183.82	25.70	162.29	158.30
LAA	mayo	2006	79.40	29.14	5.16	2.99	133.62	1.55	7.65	56.42	10.83	67.61	136.72
LAA	mayo	2007	58.80	49.48	6.38	21.82	224.85	11.81	15.92	124.69	26.10	194.58	187.50
LAA	mayo	2008	19.60	61.05	5.32	27.11	229.43	14.12	55.77	129.79	39.48	160.45	209.28
LAA	mayo	2009	57.50	36.87	7.31	15.73	156.85	6.93	21.03	65.92	12.39	56.54	119.35
LAA	junio	2004	159.10	19.76	6.30	1.92	116.95	1.52	4.90	47.36	9.62	37.62	44.98
LAA	junio	2005	58.50	18.90	6.51	0.12	146.47	0.95	2.01	38.36	8.44	25.47	55.10
LAA	junio	2006	114.90	30.51	4.75	4.26	146.10	2.01	5.47	46.19	7.76	50.15	91.33
LAA	junio	2007	133.70	35.11	4.75	65.77	1155.48	34.22	141.27	858.75	89.67	827.10	929.07
LAA	junio	2008	153.30	31.48	4.83	17.48	102.36	5.35	20.67	47.71	23.23	79.18	88.95
LAA	junio	2009	124.20	20.02	6.04	7.70	57.75	0.80	3.11	65.14	7.70	47.27	63.30
LAA	junio	2003	126.70	19.71	6.75	9.07	108.17	2.54	5.89	56.81	32.26	39.48	74.44
LAA	julio	2004	139.10	22.63	6.42	2.06	117.95	1.68	5.40	55.13	9.20	55.44	70.41
LAA	julio	2005	54.60	33.04	6.27	9.16	203.28	3.62	8.67	87.18	7.92	69.39	118.48
LAA	julio	2006	142.70	15.63	6.38	33.08	59.62	20.61	4.30	34.72	14.64	41.98	59.38
LAA	julio	2007	126.40	15.35	5.85	3.20	61.18	1.44	4.08	28.54	8.98	31.14	69.17
LAA	julio	2008	114.00	13.96	5.76	2.28	47.53	3.74	5.26	23.16	7.65	28.63	38.79
LAA	julio	2009	60.60	26.44	6.67	5.73	79.95	24.13	9.80	69.61	6.65	52.88	55.86
LAA	julio	2003	147.60	19.82	6.73	13.75	80.44	1.43	8.25	51.36	22.78	35.68	44.32
LAA	agosto	2004	144.50	14.91	6.55	0.55	70.37	0.85	2.72	38.63	0.39	32.58	16.09
LAA	agosto	2005	139.70	16.39	6.14	0.42	114.78	0.62	3.40	41.87	5.48	35.17	66.38
LAA	agosto	2006	158.60	21.19	5.31	1.56	102.78	3.39	3.67	65.90	35.11	39.54	83.33
LAA	agosto	2007	132.90	18.06	6.28	4.56	68.78	2.58	3.90	22.66	2.91	17.49	37.62
LAA	agosto	2008	218.80	23.61	5.32	8.46	109.29	7.47	14.02	43.12	13.79	70.60	87.04
LAA	agosto	2009	95.60	17.76	6.07	5.98	51.94	4.85	25.08	31.75	5.98	36.67	50.98
LAA	agosto	2003	91.70	22.26	6.67	11.97	80.57	2.58	60.76	60.49	2.48	43.90	38.99
LAA	septiembre	2004	124.30	23.13	5.29	1.18	121.56	4.42	14.21	73.45	4.06	31.25	41.85
LAA	septiembre	2005	34.80	22.66	6.50	3.72	52.11	3.05	0.00	0.00	13.23	42.40	84.97
LAA	septiembre	2006	116.50	24.32	4.80	0.75	66.25	0.48	0.21	28.18	5.42	30.65	63.05
LAA	septiembre	2007	103.90	1.99	6.31	5.19	101.98	3.83	5.46	40.01	6.73	34.00	46.49
LAA	septiembre	2008	51.30	26.83	6.24	16.45	212.62	10.30	19.34	83.89	13.04	64.17	266.40
LAA	septiembre	2009	185.50	24.31	4.83	0.05	84.02	0.00	3.17	19.92	5.94	45.49	69.96
LAA	septiembre	2003	174.20	20.93	5.92	20.75	92.11	3.72	18.69	45.61	5.76	37.65	42.61
LAA	octubre	2004	74.90	35.97	5.25	0.42	135.08	0.86	2.78	158.64	9.91	33.06	62.09
LAA	octubre	2005	145.70	15.90	5.32	0.73	5.14	0.24	0.65	7.18	5.05	36.08	58.28
LAA	octubre	2006	17.70	28.30	5.92	0.43	46.11	11.90	0.82	47.00	7.63	47.26	102.08
LAA	octubre	2007	28.30	13.06	5.91	3.35	101.12	1.99	5.37	26.88	3.97	53.03	53.47
LAA	octubre	2008	20.80	24.10	6.65	6.40	82.70	8.61	16.16	32.63	3.67	39.52	66.46
LAA	octubre	2009	76.90	22.40	5.34	2.92	100.27	0.16	1.60	34.42	4.87	57.56	66.11
LAA	octubre	2003	50.80	27.51	5.43	12.97	169.69	4.70	18.09	46.38	11.81	10.60	62.30
LAA	noviembre	2004	10.50	7.91	4.73	10.50	10.50	10.50	10.50	10.50	10.50	10.50	10.50

LLUVIA ÁCIDA EN LA ZMCM. EVALUACIÓN Y TRASCENDENCIA. ANEXO I

CLAVE		AÑO	vol. lluvia (mm)	POND.COND	PH POND	CONCENTRACION PONDERADA $\mu$ Eq/L							
						Na+	NH4-	K+	Mg2+	Ca+	[CL-]	[NO3-]	[SO4=]
TLA	mayo	2004	47.90	35.74	6.06	0.11	219.60	11.25	36.20	89.17	12.61	86.45	121.66
TLA	mayo	2005	23.00	160.77	6.73	10.68	1253.79	54.10	67.35	696.41	31.68	303.30	562.44
TLA	mayo	2006	71.00	23.35	5.11	6.32	131.33	2.97	3.52	37.22	11.25	45.86	97.22
TLA	mayo	2007	25.40	91.85	6.17	30.53	348.41	26.04	49.29	294.80	42.71	384.06	326.38
TLA	mayo	2008	13.00	52.40	6.59	15.53	200.60	10.44	19.59	79.14	27.35	158.26	129.36
TLA	mayo	2009	36.80	42.48	6.82	12.07	156.90	7.38	12.92	104.04	10.14	76.38	125.51
TLA	junio	2004	181.00	21.29	5.43	35.48	103.05	0.34	1.10	39.56	8.45	18.19	50.49
TLA	junio	2005	73.80	18.93	6.64	0.14	119.06	1.47	5.67	46.35	7.72	23.05	53.00
TLA	junio	2006	128.90	23.42	5.07	0.00	135.57	0.45	5.67	49.04	13.40	53.97	83.79
TLA	junio	2007	106.60	51.37	4.39	19.63	185.18	11.83	21.56	99.78	46.26	117.68	160.75
TLA	junio	2008	176.20	31.32	5.87	27.23	100.73	7.53	13.06	29.11	29.36	98.77	48.87
TLA	junio	2009	76.20	17.65	5.80	7.20	40.66	0.85	8.91	65.48	6.77	35.05	56.92
TLA	junio	2003	187.10	18.57	6.85	8.28	101.21	1.17	5.55	39.34	27.93	38.01	43.11
TLA	julio	2004	107.80	29.74	6.23	3.21	126.03	4.37	14.07	100.32	9.84	69.76	54.02
TLA	julio	2005	86.80	36.19	5.91	0.11	136.45	2.58	7.61	47.71	6.94	56.79	87.26
TLA	julio	2006	128.80	17.92	6.30	6.04	79.69	4.08	4.05	56.91	13.38	49.09	48.78
TLA	julio	2007	164.70	25.83	6.27	3.45	148.21	3.06	6.67	75.53	13.37	54.30	94.00
TLA	julio	2008	183.30	17.64	5.19	3.76	52.20	4.34	8.15	24.74	6.61	40.09	39.54
TLA	julio	2009	49.10	27.22	6.68	17.25	59.82	1.23	17.13	56.65	9.73	39.29	49.89
TLA	julio	2003	125.40	28.13	6.86	18.51	130.40	2.09	8.50	64.86	36.21	72.14	75.40
TLA	agosto	2004	147.60	15.22	6.53	0.43	73.42	2.59	8.33	52.64	3.77	11.09	21.10
TLA	agosto	2005	181.00	16.47	5.52	1.54	95.63	1.30	2.94	30.56	7.02	37.88	51.44
TLA	agosto	2006	176.50	24.83	5.04	2.76	86.30	1.89	1.58	61.66	28.38	33.17	80.86
TLA	agosto	2007	126.40	13.95	6.55	2.55	115.31	2.58	5.90	34.51	3.50	57.42	77.94
TLA	agosto	2008	166.00	23.43	5.02	8.44	87.67	4.95	9.30	47.69	13.58	69.50	69.07
TLA	agosto	2009	103.20	22.47	6.27	9.45	75.41	3.72	27.35	43.97	9.45	39.98	69.43
TLA	agosto	2003	143.60	19.49	7.03	16.85	79.21	2.67	14.53	72.86	3.20	20.49	49.81
TLA	septiembre	2004	229.30	24.03	5.23	0.52	81.64	3.15	10.15	55.58	1.59	20.50	43.89
TLA	septiembre	2005	72.20	14.29	6.53	2.92	73.90	0.90	4.84	44.01	8.10	17.39	47.67
TLA	septiembre	2006	102.70	23.65	4.90	1.41	83.96	2.80	3.01	58.58	1.67	33.03	69.55
TLA	septiembre	2007	106.50	2.87	6.50	8.01	164.35	3.50	6.88	62.88	6.79	35.35	55.45
TLA	septiembre	2008	130.90	24.78	5.13	6.20	80.07	9.08	17.05	31.59	8.65	45.72	73.58
TLA	septiembre	2009	115.10	25.15	4.89	0.96	74.68	0.00	4.46	35.72	3.37	55.67	70.57
TLA	septiembre	2003	252.30	16.96	6.51	27.87	54.32	10.35	18.68	45.69	35.61	14.54	64.11
TLA	octubre	2003	19.40	35.74	6.86	11.58	113.78	2.29	16.84	68.32	32.84	47.63	45.77
TLA	octubre	2004	158.70	24.43	5.30	0.37	93.93	0.26	0.82	145.33	19.38	117.58	43.88
TLA	octubre	2005	52.10	20.16	5.24	2.29	78.59	0.43	5.32	16.40	7.37	51.51	73.98
TLA	octubre	2006	12.40	24.50	6.49	4.78	175.96	7.64	11.98	157.90	7.99	48.57	134.97
TLA	octubre	2007	92.60	18.55	6.27	18.81	280.04	10.43	17.86	260.14	11.59	182.21	256.36
TLA	octubre	2008	22.60	21.48	6.55	4.59	81.09	6.06	12.21	40.42	3.45	40.74	69.42
TLA	octubre	2009	134.10	15.94	5.63	7.50	71.67	0.07	0.24	30.14	15.50	36.65	54.88

LLUVIA ÁCIDA EN LA ZMCM. EVALUACIÓN Y TRASCENDENCIA. ANEXO I

CLAVE		AÑO	vol. lluvia (mm)	POND.COND	PH POND	CONCENTRACION PONDERADA $\mu$ Eq/L							
						Na+	NH4-	K+	Mg2+	Ca+	[CL-]	[NO3-]	[SO4=]
MCM	mayo	2004.00	50.10	47.28	5.28	2.01	196.96	5.88	18.91	85.94	12.82	119.23	164.87
MCM	mayo	2005.00	6.50	203.20	6.22	111.06	461.49	69.28	77.43	485.52	71.92	510.48	552.29
MCM	mayo	2006.00	105.60	24.27	5.20	2.38	129.63	1.15	4.69	41.68	9.96	40.19	110.94
MCM	mayo	2007.00	48.50	58.88	6.58	39.16	208.28	9.23	25.40	153.50	29.15	222.32	163.18
MCM	mayo	2008.00	32.30	59.75	6.57	27.19	249.64	15.21	50.26	130.66	36.91	162.45	218.55
MCM	mayo	2009.00	42.20	57.46	3.21	11.51	182.05	9.77	19.57	147.96	13.01	105.65	142.98
MCM	junio	2003.00	209.70	28.40	7.34	5.53	124.65	0.90	43.15	48.69	70.15	41.85	87.16
MCM	junio	2004.00	118.40	24.76	7.00	0.95	99.58	1.05	3.37	32.05	8.45	44.82	56.70
MCM	junio	2005.00	104.70	21.16	6.55	0.00	163.91	1.88	3.70	54.55	3.76	26.89	48.16
MCM	junio	2006.00	62.50	27.55	5.91	0.00	116.46	1.94	11.54	63.52	29.01	63.73	111.57
MCM	junio	2007.00	149.20	35.52	4.59	8.81	123.01	7.74	11.70	133.16	21.45	99.02	175.58
MCM	junio	2008.00	110.10	31.64	5.65	25.30	139.88	8.11	7.27	48.46	22.92	73.42	120.44
MCM	junio	2009.00	208.00	18.15	6.21	12.25	45.78	1.08	7.13	66.29	8.62	42.25	52.05
MCM	julio	2004.00	136.70	17.32	6.48	1.59	96.27	2.21	7.12	25.50	7.62	38.31	38.87
MCM	julio	2005.00	170.80	18.67	6.52	2.41	117.52	2.53	4.76	30.84	0.87	39.22	76.43
MCM	julio	2006.00	114.90	17.28	6.50	8.34	96.87	6.15	14.03	72.27	25.61	40.09	65.38
MCM	julio	2007.00	118.60	30.93	5.86	97.40	65.41	17.64	256.91	31.91	23.50	132.71	184.25
MCM	julio	2008.00	147.50	19.68	5.27	5.40	69.75	4.12	6.94	28.83	11.62	56.38	42.29
MCM	julio	2009.00	84.10	32.84	6.81	12.48	90.85	2.49	38.14	105.63	11.89	62.48	71.73
MCM	julio	2003.00	190.80	18.73	6.83	10.83	98.41	1.72	9.52	49.41	25.44	51.49	47.87
MCM	agosto	2004.00	143.80	24.41	6.44	0.43	95.25	1.60	5.16	47.60	27.42	20.65	26.00
MCM	agosto	2005.00	158.67	13.93	5.96	1.19	104.20	1.12	2.13	25.01	5.99	21.58	59.57
MCM	agosto	2006.00	208.30	21.39	6.01	0.40	85.61	3.81	3.34	68.56	34.07	28.78	88.51
MCM	agosto	2007.00	165.20	12.81	6.40	2.23	100.29	1.80	4.37	24.48	2.44	29.02	53.88
MCM	agosto	2008.00	143.30	23.05	5.42	7.38	95.38	7.40	13.89	37.63	14.14	68.81	65.54
MCM	agosto	2009.00	95.20	14.97	5.90	5.69	46.69	3.96	19.64	15.39	5.69	28.71	45.51
MCM	agosto	2003.00	292.60	21.49	6.83	8.66	40.60	2.63	19.43	22.32	2.59	25.22	27.33
MCM	septiembre	2004.00	144.30	18.95	6.40	5.93	75.06	3.15	10.15	32.66	8.68	18.06	27.45
MCM	septiembre	2005.00	53.20	27.63	6.74	3.10	143.71	1.69	3.05	94.10	15.61	37.40	81.44
MCM	septiembre	2006.00	94.40	29.36	4.73	0.68	78.63	0.88	2.55	36.98	11.05	40.13	59.92
MCM	septiembre	2007.00	118.00	10.13	6.36	4.03	82.00	4.41	7.99	49.59	7.82	29.42	49.11
MCM	septiembre	2008.00	105.60	25.01	5.81	6.76	90.29	6.57	12.38	35.63	9.46	62.50	68.63
MCM	septiembre	2009.00	127.80	23.87	5.11	73.23	19.43	4.46	7.96	22.64	4.53	55.59	66.23
MCM	septiembre	2003.00	199.40	23.98	5.29	20.59	73.10	1.96	28.37	51.54	22.36	30.26	47.05
MCM	octubre	2004.00	48.10	42.68	4.76	0.00	162.98	0.23	0.75	169.87	7.58	34.56	67.23
MCM	octubre	2005.00	89.10	18.20	6.31	3.08	45.29	2.12	3.41	31.82	7.99	32.67	75.28
MCM	octubre	2006.00	5.20	19.20	6.59	0.43	72.22	0.51	0.82	19.00	0.28	27.10	71.04
MCM	octubre	2007.00	41.10	16.06	5.55	3.40	97.17	4.09	4.37	49.86	3.99	20.74	32.93
MCM	octubre	2008.00	6.50	23.40	6.62	6.15	79.51	8.24	15.46	31.37	5.65	42.58	57.92
MCM	octubre	2009.00	77.50	19.48	5.87	1.45	113.37	0.00	0.00	11.18	4.68	65.98	66.49
MCM	octubre	2003.00	52.40	50.55	6.98	12.25	144.36	3.46	7.03	75.79	12.09	46.99	42.10
MCM	noviembre	2004.00	8.60	61.40	7.01	5.22	290.00	6.65	21.40	400.50	7.91	5.16	0.21
MCM	noviembre	2005.00	16.00	89.83	6.62	0.35	437.01	24.14	31.30	184.44	21.12	111.94	158.71

LLUVIA ÁCIDA EN LA ZMCM. EVALUACIÓN Y TRASCENDENCIA. ANEXO I

CLAVE		AÑO	vol. lluvia (mm)	POND.COND	PH POND	CONCENTRACION PONDERADA $\mu$ Eq/L							
						Na+	NH4-	K+	Mg2+	Ca+	[CL-]	[NO3-]	[SO4=]
DIC	mayo	2004	35.20	27.26	5.73	171.54	151.50	3.15	10.14	71.43	13.62	87.54	81.66
DIC	mayo	2005	15.40	88.43	6.40	28.30	260.63	18.59	22.85	210.56	39.57	177.64	232.60
DIC	mayo	2006	106.50	27.07	5.04	8.32	120.08	5.10	5.71	53.94	5.82	46.81	90.89
DIC	mayo	2007	47.30	54.41	5.96	33.04	238.68	14.39	49.92	133.68	27.58	201.95	185.37
DIC	mayo	2008	101.50	43.54	6.50	30.67	135.16	24.18	77.20	55.92	27.19	116.31	158.67
DIC	mayo	2009	72.20	31.68	6.07	7.34	138.18	3.98	5.56	74.26	9.07	95.09	78.97
DIC	junio	2004	201.00	23.39	5.39	2.82	59.17	5.25	16.89	41.32	8.19	50.68	59.49
DIC	junio	2005	183.10	15.87	6.14	0.00	105.80	2.50	3.73	29.26	1.72	24.41	47.61
DIC	junio	2006	139.60	22.38	5.86	0.95	130.95	0.69		57.22	20.08	57.15	85.89
DIC	junio	2007	134.00	41.27	4.58	6.79	183.21	10.50	13.50	108.16	17.95	129.81	136.03
DIC	junio	2008	268.20	20.10	5.00	5.19	73.61	3.92	7.97	16.64	12.86	49.89	45.93
DIC	junio	2009	71.80	25.39	6.95	12.08	61.21	1.42	11.82	72.17	12.08	50.89	64.52
DIC	junio	2003	192.40	19.26	6.44	8.84	109.37	2.48	3.97	47.29	31.92	24.56	46.44
DIC	julio	2004	127.10	20.25	5.76	4.56	91.05	2.75	8.84	39.75	8.47	49.93	51.13
DIC	julio	2005	144.00	26.60	5.52	0.00	134.56	1.86	6.19	47.40	2.21	38.03	77.24
DIC	julio	2006	191.70	16.71	6.11	7.83	85.78	4.45	15.19	43.81	23.19	46.59	66.79
DIC	julio	2007	156.50	14.15	5.61	16.64	85.60	6.34	7.54	100.11	7.27	51.51	58.39
DIC	julio	2008	269.40	21.18	5.07	5.09	65.78	5.45	8.71	33.25	10.37	47.59	56.03
DIC	julio	2009	55.70	21.84	6.99	6.39	74.42	1.80	12.73	85.39	6.80	58.62	57.77
DIC	julio	2003	167.60	26.53	6.46	16.01	139.31	2.18	7.29	52.60	6.39	62.55	67.41
DIC	agosto	2003	131.90	26.66	5.95	17.47	113.75	4.11	31.38	78.49	3.06	46.84	70.60
DIC	agosto	2004	223.10	19.35	5.78	1.30	97.01	2.67	8.59	42.02	3.13	19.41	29.78
DIC	agosto	2005	226.20	16.29	5.87	2.32	99.42	1.98	6.05	30.72	7.13	36.82	53.12
DIC	agosto	2006	321.10	17.94	4.97	0.41	70.87	0.89	1.61	52.59	25.95	31.11	62.87
DIC	agosto	2007	246.40	16.59	5.59	4.09	109.87	2.82	6.42	48.16	12.63	30.26	61.80
DIC	agosto	2008	105.30	28.79	5.09	9.20	118.92	9.26	17.39	46.91	21.15	87.87	87.17
DIC	agosto	2009	107.60	23.81	5.87	6.77	74.43	4.70	33.40	36.19	6.77	48.83	67.94
DIC	septiembre	2004	158.10	20.39	5.37	4.81	94.58	5.99	19.26	44.75	5.52	18.82	26.30
DIC	septiembre	2005	70.60	22.14	5.39	5.47	100.77	1.55	6.70	51.22	4.99	30.84	60.31
DIC	septiembre	2006	165.50	18.80	6.19	5.47	90.78	6.99	4.99	65.60	4.97	26.23	62.92
DIC	septiembre	2007	203.90	3.80	5.85	2.00	121.36	1.99	6.06	35.37	13.76	58.84	73.29
DIC	septiembre	2008	126.60	18.34	5.23	3.41	53.53	7.48	14.04	21.12	7.82	25.27	49.58
DIC	septiembre	2009	215.80	22.68	4.73	0.62	61.54	1.30	3.88	18.53	6.73	39.52	48.92
DIC	septiembre	2003	215.30	18.79	5.93	23.00	52.65	1.01	16.83	58.26	12.84	33.28	43.52
DIC	octubre	2003	82.20	26.22	6.00	35.79	147.67	7.67	8.94	93.18	9.95	49.88	55.45
DIC	octubre	2004	36.80	49.92	4.82	0.43	58.07	0.26	0.82	239.35	18.49	21.09	55.29
DIC	octubre	2005	85.10	14.20	5.62	0.87	7.41	0.51	0.87	11.67	0.31	32.96	43.89
DIC	octubre	2006	33.80	31.60	6.18	0.43	45.56	1.02	0.82	38.00	13.28	83.55	84.17
DIC	octubre	2007	74.40	16.23	4.87	1.74	161.59	1.28	4.60	26.09	17.53	29.37	45.04
DIC	octubre	2008	46.10	27.71	5.19	8.13	105.04	9.27	17.40	41.44	8.68	77.22	69.52
DIC	octubre	2009	97.20	14.02	5.18	0.60	56.40	0.00	0.93	15.09	4.96	30.59	44.89

LLUVIA ÁCIDA EN LA ZMCM. EVALUACIÓN Y TRASCENDENCIA. ANEXO I

CLAVE		AÑO	vol. lluvia (mm)	POND.COND	PH POND	CONCENTRACION PONDERADA $\mu$ Eq/L							
						Na+	NH4-	K+	Mg2+	Ca+	[CL-]	[NO3-]	[SO4=]
EAJ	mayo	2004	113.50	22.59	4.55	1.36	146.41	3.64	11.73	60.09	5.66	36.47	45.33
EAJ	mayo	2005	30.90	61.78	6.74	22.08	221.94	15.23	23.53	120.89	15.30	162.14	168.09
EAJ	mayo	2006	104.70	26.73	4.92	3.37	116.49	1.91	3.00	48.25	6.50	62.08	98.17
EAJ	mayo	2007	93.30	31.80	5.47	13.65	146.69	9.10	21.83	115.70	30.44	115.39	146.60
EAJ	mayo	2008	69.80	31.17	5.71	10.93	149.34	6.90	14.26	53.32	18.63	67.13	122.92
EAJ	mayo	2009	22.90	25.83	6.59	10.27	110.85	5.55	10.70	52.44	9.85	63.51	62.83
EAJ	junio	2003	226.70	19.46	6.13	7.56	103.01	1.71	5.20	47.20	20.38	33.83	51.29
EAJ	junio	2004	239.60	23.72	5.42	2.26	95.16	2.52	8.10	27.29	2.38	35.10	36.32
EAJ	junio	2005	258.80	14.03	5.69	0.08	88.26	0.63	4.17	24.86	4.11	24.65	52.03
EAJ	junio	2006	101.00	20.56	5.29	3.40	110.47	2.00	5.33	56.63	11.07	56.81	73.70
EAJ	junio	2007	121.00	40.33	4.34	14.83	142.85	10.06	13.28	130.71	15.50	78.42	152.04
EAJ	junio	2008	278.00	21.11	4.71	12.06	60.42	2.96	2.66	17.29	19.93	41.64	42.99
EAJ	junio	2009	71.20	28.69	6.53	17.71	84.27	1.46	11.97	73.38	9.76	65.74	76.27
EAJ	julio	2003	172.50	22.46	5.73	8.69	114.54	1.94	4.64	48.67	8.17	55.83	70.37
EAJ	julio	2004	157.40	17.42	6.55	2.29	89.40	4.52	14.53	36.41	10.56	38.45	51.77
EAJ	julio	2005	172.70	24.31	5.25	5.51	126.50	11.21	7.52	45.52	3.49	71.43	74.18
EAJ	julio	2006	214.00	18.08	5.72	10.21	93.18	5.06	14.47	40.27	24.25	28.39	64.42
EAJ	julio	2007	160.80	9.71	5.43	6.09	98.01	2.59	5.95	55.71	9.85	74.56	77.76
EAJ	julio	2008	238.70	19.93	5.33	5.36	69.21	5.49	9.50	34.47	10.81	51.57	54.04
EAJ	julio	2009	115.40	16.43	6.38	23.89	38.49	0.70	4.70	47.37	9.25	38.94	48.42
EAJ	agosto	2004	260.70	21.46	5.12	0.36	69.44	0.49	1.57	61.91	15.65	14.90	30.60
EAJ	agosto	2005	311.30	11.83	6.06	1.30	93.72	0.09	3.24	24.48	5.00	25.30	36.66
EAJ	agosto	2006	575.91	18.34	5.04	73.10	83.50	60.51	95.60	94.66	64.01	53.16	36.11
EAJ	agosto	2007	571.24	9.25	5.40	4.23	58.14	3.40	5.54	41.50	2.86	22.71	35.24
EAJ	agosto	2008	130.40	30.21	4.71	7.38	70.77	4.88	9.17	29.78	17.15	55.63	60.84
EAJ	agosto	2009	143.40	20.82	5.97	6.28	67.08	3.56	32.05	27.79	6.04	45.96	61.44
EAJ	agosto	2003	163.90	22.66	5.31	18.01	75.63	3.97	11.35	84.42	3.16	33.37	68.93
EAJ	septiembre	2004	216.90	15.67	5.25	2.99	79.88	4.78	15.37	34.98	4.15	21.78	23.36
EAJ	septiembre	2005	304.69	13.28	6.38	46.99	47.96	26.84	48.48	46.30	35.08	32.70	22.33
EAJ	septiembre	2006	251.50	17.36	6.21	1.41	100.57	5.26	10.36	31.49	10.25	23.40	60.54
EAJ	septiembre	2007	190.10	9.78	5.16	3.03	126.27	5.00	4.71	63.16	24.44	96.44	149.49
EAJ	septiembre	2008	145.80	13.99	5.63	3.31	47.20	5.61	10.53	18.62	7.96	24.76	36.87
EAJ	septiembre	2009	205.60	27.35	4.56	0.22	62.74	0.00	0.59	18.25	5.24	43.95	53.41
EAJ	septiembre	2003	203.50	16.26	6.06	20.05	58.48	1.62	5.40	30.47	9.53	33.96	49.31
EAJ	octubre	2004	32.70	53.76	4.43	0.20	129.85	8.22	26.46	178.99	20.56	51.00	75.62
EAJ	octubre	2005	112.50	12.25	5.25	3.61	40.91	4.39	4.38	12.23	4.11	31.65	30.40
EAJ	octubre	2006	38.10	29.60	5.86	11.74	60.00	1.53	9.88	34.00	92.66	56.94	175.21
EAJ	octubre	2007	77.40	15.12	4.60	1.87	104.31	1.61	3.61	27.97	5.69	52.01	43.43
EAJ	octubre	2008	45.20	21.35	5.74	31.95	60.14	6.82	12.50	36.36	28.37	40.88	57.64
EAJ	octubre	2009	90.00	23.46	4.92	12.50	55.74	0.20	0.62	16.70	25.57	32.77	41.26
EAJ	octubre	2003	107.00	25.28	5.09	12.95	125.83	1.67	11.72	54.00	9.64	46.80	69.70

LLUVIA ÁCIDA EN LA ZMCM. EVALUACIÓN Y TRASCENDENCIA. ANEXO I

CLAVE		AÑO	vol. lluvia (mm)	POND.COND	PH POND	CONCENTRACION PONDERADA $\mu$ Eq/L							
						Na+	NH4-	K+	Mg2+	Ca+	[CL-]	[NO3-]	[SO4=]
EDL	mayo	2004	83.70	26.99	5.16	0.43	106.86	7.13	22.94	66.50	9.33	44.80	88.06
EDL	mayo	2005	25.70	51.61	6.35	4.78	46.44	16.37	25.12	144.18	16.16	102.51	185.78
EDL	mayo	2006	94.40	26.37	4.66	2.77	139.92	0.96	3.58	38.91	9.86	63.49	131.99
EDL	mayo	2007	87.20	41.95	5.07	13.16	158.01	7.51	20.82	116.12	18.71	150.05	177.28
EDL	mayo	2008	44.70	30.10	5.89	9.41	132.58	7.05	18.81	57.45	13.41	61.22	121.00
EDL	mayo	2009	67.40	28.46	5.51	9.21	115.63	3.67	11.87	50.56	6.32	91.73	68.46
EDL	junio	2004	297.90	15.81	5.33	0.69	81.36	1.72	5.52	45.82	7.16	31.79	33.56
EDL	junio	2005	302.50	14.30	5.53	0.12	89.95	2.04	4.20	19.73	4.85	19.69	41.10
EDL	junio	2006	191.90	20.72	4.84	1.32	84.47	10.45	1.23	26.27	10.35	40.45	56.92
EDL	junio	2007	162.40	33.57	4.36	6.72	130.54	6.45	9.31	92.68	9.27	121.38	95.12
EDL	junio	2008	312.70	16.62	5.43	5.09	52.62	3.47	10.93	41.81	10.48	42.30	58.99
EDL	junio	2009	255.70	15.08	5.93	5.59	40.50	0.67	5.78	46.16	3.49	38.78	40.62
EDL	junio	2003	442.10	13.21	6.24	8.47	73.39	2.86	8.43	29.99	13.47	26.91	42.74
EDL	julio	2004	327.40	18.48	5.20	0.89	69.08	2.17	7.00	39.62	7.71	41.38	43.80
EDL	julio	2005	179.40	18.65	5.77	0.60	114.72	3.44	4.94	78.93	7.12	37.80	68.05
EDL	julio	2006	293.40	10.39	5.78	2.81	56.70	5.59	1.46	24.43	7.40	27.42	59.07
EDL	julio	2007	296.30	15.30	5.08	1.98	65.62	2.28	7.66	64.18	4.78	36.89	72.08
EDL	julio	2008	388.50	18.75	5.13	4.95	63.97	3.98	6.19	27.47	6.62	48.36	45.62
EDL	julio	2009	236.20	17.53	5.88	7.22	55.61	1.71	8.13	62.19	8.49	43.68	58.29
EDL	julio	2003	518.25	19.98	5.86	82.32	82.68	59.53	86.15	81.30	56.37	48.16	28.01
EDL	agosto	2003	181.70	16.87	5.56	18.98	51.01	2.92	60.99	49.44	6.62	32.27	77.90
EDL	agosto	2004	227.70	15.27	6.81	0.30	71.14	0.56	1.81	40.05	0.23	13.78	25.79
EDL	agosto	2005	278.80	11.90	5.15	1.38	61.63	0.08	2.95	20.63	0.44	25.86	42.80
EDL	agosto	2006	365.00	16.57	4.35	0.34	68.68	2.23	0.64	27.18	6.42	23.94	54.26
EDL	agosto	2007	310.50	7.59	5.32	1.91	70.19	5.75	10.77	59.03	11.30	40.44	84.64
EDL	agosto	2008	316.30	22.03	4.75	10.08	130.16	7.33	12.49	51.34	20.38	117.12	80.01
EDL	agosto	2009	311.30	15.35	6.32	4.01	50.87	2.96	20.29	7.78	4.06	29.67	46.84
EDL	septiembre	2003	180.20	12.03	6.17	21.22	57.44	1.85	25.32	23.14	13.73	49.70	64.31
EDL	septiembre	2004	320.10	15.28	5.15	0.31	77.58	2.24	7.22	39.07	97.97	10.77	20.98
EDL	septiembre	2005	323.10	13.45	5.83	1.90	74.41	1.40	2.32	33.12	10.21	18.86	23.99
EDL	septiembre	2006	254.10	15.22	5.37	1.55	70.65	1.23	3.50	34.84	0.14	20.21	62.81
EDL	septiembre	2007	257.50	7.23	5.05	2.59	82.77	2.23	5.13	23.60	8.87	24.46	60.50
EDL	septiembre	2008	319.40	11.56	5.73	1.17	36.75	4.71	8.83	13.67	7.49	19.63	29.49
EDL	septiembre	2009	188.60	17.12	4.80	0.00	35.62	0.00	0.00	16.91	0.97	21.73	36.80
EDL	octubre	2004	60.10	33.36	4.48	0.43	75.16	0.79	2.53	84.55	14.86	34.55	39.82
EDL	octubre	2005	77.10	22.25	4.60	0.99	19.47	0.87	1.67	14.37	9.34	45.99	50.41
EDL	octubre	2006	47.60	26.80	5.42	0.43	40.56	0.26	2.47	97.00	45.76	57.26	79.17
EDL	octubre	2007	82.00	13.52	5.30	1.74	44.96	1.28	4.12	16.99	2.26	25.78	56.22
EDL	octubre	2008	61.70	16.71	6.46	46.99	48.23	5.76	12.10	34.95	48.28	25.39	51.03
EDL	octubre	2009	83.70	22.83	5.14	1.10	53.55	1.29	2.94	14.36	5.10	41.85	31.73
EDL	octubre	2003	142.60	20.75	5.08	18.37	114.39	1.96	11.66	47.89	29.47	42.24	47.19

LLUVIA ÁCIDA EN LA ZMCM. EVALUACIÓN Y TRASCENDENCIA. ANEXO I

CLAVE		AÑO	vol. lluvia (mm)	POND.COND	PH POND	CONCENTRACION PONDERADA $\mu$ Eq/L							
						Na+	NH4-	K+	Mg2+	Ca+	[CL-]	[NO3-]	[SO4=]
LOM	mayo	2004	75.20	35.67	5.27	0.76	93.14	6.02	19.37	86.70	8.92	67.29	101.45
LOM	mayo	2005	3.20	115.70	6.38	20.43	466.11	26.60	32.92	352.00	47.74	216.61	413.13
LOM	mayo	2006	192.54	17.29	5.25	0.59	54.50	0.57	2.30	11.97	2.76	20.65	38.99
LOM	mayo	2007	204.24	7.45	6.30	28.17	311.67	16.15	31.28	201.00	37.61	311.29	205.21
LOM	mayo	2008	26.20	115.45	6.13	161.23	160.38	416.39	62.30	74.00	57.98	301.23	477.50
LOM	mayo	2009	59.00	50.65	4.75	20.88	155.42	8.52	14.14	92.87	14.01	82.23	138.12
LOM	junio	2004	201.70	28.83	4.79	40.70	143.96	4.66	15.01	85.28		70.97	68.97
LOM	junio	2005	169.50	13.03	6.35	0.28	103.22	0.86	1.32	18.79	8.54	21.13	
LOM	junio	2006	163.90	22.30	5.40	0.00	98.87	2.84	3.66	48.94	18.00	54.87	88.57
LOM	junio	2007	124.20	43.61	4.79	9.04	157.96	7.12	9.54	128.55	9.72	145.50	142.66
LOM	junio	2008	200.10	33.49	5.65	13.13	125.74	10.46	11.92	42.19	20.26	103.67	75.29
LOM	junio	2009	147.20	23.51	6.09	6.02	58.62	0.71	9.42	75.71	5.11	50.20	64.34
LOM	junio	2003	155.30	16.47	5.96	8.83	95.99	2.36	12.13	38.59	34.71	39.35	59.27
LOM	julio	2004	202.70	22.51	6.01	1.61	108.08	2.63	8.45	49.15	7.31	48.74	59.21
LOM	julio	2005	132.70	26.77	5.14	0.34	127.18	1.27	0.25	42.08	5.24	47.27	69.07
LOM	julio	2006	259.10	14.66	5.79	15.27	77.87	6.42	20.46	38.23	10.46	48.38	75.52
LOM	julio	2007	222.60	12.46	5.15	6.75	119.68	4.05	6.86	53.99	9.23	56.40	86.78
LOM	julio	2008	170.10	31.60	0.51	12.12	156.61	11.55	19.67	61.78	13.55	108.44	129.93
LOM	julio	2009	181.70	25.81	6.47	14.59	65.66	1.98	13.61	96.84	10.07	56.54	78.17
LOM	julio	2003	242.90	22.48	6.47	12.49	95.63	2.19	10.13	55.23	17.00	46.22	73.35
LOM	agosto	2003	185.30	23.61	6.40	17.41	84.85	1.65	31.22	93.01	4.48	37.57	72.36
LOM	agosto	2004	214.60	18.51	5.79	0.79	71.96	1.94	6.24	42.79	0.20	15.64	20.85
LOM	agosto	2005	185.90	13.35	5.26	0.43	108.64	0.19	1.47	21.81	1.54	33.40	46.70
LOM	agosto	2006	315.40	20.19	3.63	1.40	88.57	15.54	2.04	53.27	27.43	30.57	75.75
LOM	agosto	2007	160.60	19.94	5.20	7.84	108.98	12.83	12.11	48.11	14.45	44.65	66.38
LOM	agosto	2008	220.00	29.25	5.72	8.96	115.83	9.59	18.01	45.70	15.98	83.68	81.78
LOM	agosto	2009	100.40	22.79	6.79	9.82	73.90	3.91	30.11	49.12	9.82	44.02	67.43
LOM	septiembre	2004	303.60	16.29	5.67	1.70	77.55	3.08	9.91	46.79	0.36	14.42	26.09
LOM	septiembre	2005	114.60	20.33	6.49	2.73	107.96	2.45	4.62	56.78	2.82	24.07	56.62
LOM	septiembre	2006	137.00	19.04	5.74	6.12	83.62	11.75	5.05	48.72	11.42	45.33	76.41
LOM	septiembre	2007	224.80	10.73	5.36	2.04	92.63	5.90	45.65	34.92	12.53	36.48	67.14
LOM	septiembre	2008	107.30	35.53	6.29	9.74	125.86	12.45	23.37	49.66	14.76	62.25	105.20
LOM	septiembre	2009	96.30	6.33	4.78	0.36	97.95	0.60	5.99	37.32	9.19	56.12	84.04
LOM	septiembre	2003	227.60	22.43	5.07	17.28	67.44	4.22	22.88	40.39	28.43	16.00	43.15
LOM	octubre	2004	86.50	47.56	4.62	0.25	167.71	0.29	0.95	178.12	20.31	55.84	68.53
LOM	octubre	2005	81.00	13.48	5.42	39.00	0.00	3.32	70.04	14.61	0.92	36.23	36.06
LOM	octubre	2006	14.30	24.40	6.19	0.43	22.22	4.86	7.41	27.50	2.54	46.29	65.00
LOM	octubre	2007	49.90	13.95	4.83	3.63	77.83	2.18	7.27	33.34	18.53	54.97	78.55
LOM	octubre	2008	29.20	35.72	7.03	9.95	128.54	12.56	23.58	50.71	10.16	55.30	82.78
LOM	octubre	2009	106.80	32.06	5.30	46.18	128.86	1.93	1.50	44.30	17.78	89.38	113.90
LOM	octubre	2003	111.40	25.52	6.67	309.14	726.75	11.09	38.68	328.58	196.07	280.99	237.65



LLUVIA ÁCIDA EN LA ZMCM. EVALUACIÓN Y TRASCENDENCIA. ANEXO I

CLAVE		AÑO	vol. lluvia (mm)	POND.COND	PH POND	CONCENTRACION PONDERADA $\mu$ Eq/L							
						Na+	NH4-	K+	Mg2+	Ca+	[CL-]	[NO3-]	[SO4=]
PAR	mayo	2004	119.30	25.67	4.72	37.19	126.18	8.34	26.85	57.32	10.07	39.90	48.52
PAR	mayo	2005	35.50	47.34	5.24	14.34	159.34	17.67	21.96	98.29	16.75	107.67	133.00
PAR	mayo	2006	43.80	33.32	4.92	12.33	136.51	2.00	4.85	53.17	12.95	69.34	123.47
PAR	mayo	2007	83.00	46.00	5.05	15.78	192.34	9.64	19.13	135.82	48.34	183.35	152.98
PAR	mayo	2008	68.80	37.39	4.99	14.05	135.29	7.43	12.72	69.11	19.58	121.42	79.49
PAR	mayo	2009	54.80	26.14	5.55	6.49	89.07	4.04	8.44	71.97	8.02	73.38	64.27
PAR	junio	2004	133.00	23.51	4.81	1.45	73.56	4.33	13.93	34.86	56.98	45.03	40.62
PAR	junio	2005	174.70	18.64	6.12	0.22	103.55	2.45	7.44	48.11	10.55	26.86	49.74
PAR	junio	2006	215.80	17.30	5.03	0.11	78.20	0.18	2.38	27.05	6.38	29.05	70.47
PAR	junio	2007	108.90	48.86	4.14	9.43	157.16	6.28	10.02	63.78	22.47	98.11	164.39
PAR	junio	2008	167.40	24.60	4.70	8.32	53.12	3.72	8.28	19.23	14.60	42.44	50.33
PAR	junio	2009	71.10	22.07	5.31	9.87	59.37	1.42	7.24	67.82	8.38	54.42	61.92
PAR	junio	2003	220.70	20.30	5.45	10.22	66.43	0.86	2.81	30.53	25.76	24.25	40.56
PAR	julio	2004	177.50	17.83	5.61	1.36	75.76	0.86	2.76	15.92	10.05	40.32	45.74
PAR	julio	2005	201.80	26.99	4.94	0.12	112.13	2.05	1.36	29.34	10.29	40.79	84.42
PAR	julio	2006	175.20	16.85	5.24	8.70	70.66	7.03	20.71	33.20	37.88	31.37	41.62
PAR	julio	2007	137.50	37.52	4.60	25.66	182.54	7.20	19.51	125.25	20.10	161.81	127.65
PAR	julio	2008	311.10	16.14	5.02	3.65	54.25	4.65	7.84	27.53	14.95	31.82	52.52
PAR	julio	2009	136.90	18.55	5.46	12.98	57.46	0.45	4.54	46.45	7.98	55.23	47.91
PAR	julio	2003	184.00	14.48	5.77	12.63	72.07	2.00	5.84	37.41	6.03	70.56	34.05
PAR	agosto	2004	352.20	13.18	5.35	0.27	66.04	0.47	1.52	35.78	0.03	13.07	16.31
PAR	agosto	2005	347.80	14.01	5.01	1.49	58.51	0.08	0.25	9.42	7.33	16.37	29.67
PAR	agosto	2006	309.50	25.61	3.77	0.24	78.70	0.81	1.58	40.53	7.65	30.42	59.32
PAR	agosto	2007	264.10	13.95	4.95	4.41	77.37	3.36	5.58	33.56	9.75	22.69	59.63
PAR	agosto	2008	88.70	34.65	4.32	9.50	105.82	11.87	14.03	43.61	28.72	95.01	89.83
PAR	agosto	2009	199.80	15.02	5.36	6.23	51.87	1.98	23.02	17.09	8.20	33.49	46.68
PAR	agosto	2003	196.60	14.61	5.47	8.93	48.37	9.24	12.90	40.07	1.84	17.33	29.08
PAR	septiembre	2004	235.70	11.46	5.39	0.53	68.64	5.76	18.53	14.31	0.55	9.15	16.54
PAR	septiembre	2005	119.20	18.07	6.45	4.08	96.66	5.20	4.71	37.62	13.01	17.27	73.34
PAR	septiembre	2006	372.20	14.50	4.79	4.06	69.48	3.88	9.92	59.44	9.00	23.27	65.85
PAR	septiembre	2007	142.40	7.95	4.97	1.74	102.10	11.26	4.46	33.05	6.11	34.05	70.50
PAR	septiembre	2008	273.00	11.75	5.35	1.88	34.71	4.94	9.27	13.70	5.74	17.23	32.49
PAR	septiembre	2009	169.00	17.93	4.67	8.71	12.86	0.00	0.84	23.24	8.55	25.69	32.35
PAR	septiembre	2003	192.30	10.90	6.69	24.39	42.03	5.01	7.18	29.02	18.74	24.72	28.54
PAR	octubre	2003	48.80	17.00	6.45	39.69	75.13	1.18	-0.16	27.08	7.64	53.89	69.13
PAR	octubre	2004	73.40	21.37	4.84	0.43	60.25	0.26	0.82	97.86	13.22	22.91	18.20
PAR	octubre	2005	69.40	20.91	5.81	3.07	72.83	1.71	5.36	27.51	8.61	28.46	47.35
PAR	octubre	2006	34.50	15.01	5.82	0.43	66.67	8.95	8.23	28.00	14.69	27.42	82.71
PAR	octubre	2007	57.40	11.11	5.14	6.30	100.66	4.25	4.74	36.61	2.26	32.15	41.09
PAR	octubre	2008	47.20	15.37	6.42	1.81	67.37	4.21	8.64	25.82	4.17	41.68	37.70
PAR	octubre	2009	72.40	11.28	5.51	1.35	22.33	2.18	1.87	9.43	3.10	14.19	19.95

LLUVIA ÁCIDA EN LA ZMCM. EVALUACIÓN Y TRASCENDENCIA. ANEXO I

CLAVE		AÑO	vol. lluvia (mm)	POND.COND	PH POND	CONCENTRACION PONDERADA $\mu$ Eq/L							
						Na+	NH4-	K+	Mg2+	Ca+	[CL-]	[NO3-]	[SO4=]
SNT	mayo	2004	114.50	21.06	5.27	3.54	100.72	4.77	15.34	49.50	10.36	73.90	131.80
SNT	mayo	2005	40.80	48.21	4.91	2.53	167.99	15.65	2.57	87.77	26.66	111.79	134.14
SNT	mayo	2006	63.00	32.11	4.84	3.41	122.30	3.00	4.27	37.89	9.58	78.01	99.48
SNT	mayo	2007	49.40	40.42	5.44	17.68	188.19	10.71	10.74	89.99	22.39	148.43	145.76
SNT	mayo	2008	79.10	28.89	4.95	13.33	126.31	8.13	12.92	56.56	28.40	80.58	111.46
SNT	mayo	2009	76.40	20.59	6.08	17.88	87.45	6.72	9.98	41.08	5.96	47.38	51.47
SNT	junio	2004	236.10	23.76	4.81	0.98	72.43	2.72	8.76	23.88		40.15	54.61
SNT	junio	2005	275.30	28.67	5.42	0.35	114.68	1.45	3.05	35.87	7.57	32.77	58.21
SNT	junio	2006	135.30	23.18	4.49	0.67	74.28	0.85	3.57	41.05	6.59	42.70	65.77
SNT	junio	2007	162.70	38.47	4.69	21.23	169.62	8.84	10.16	86.96	28.46	125.88	147.17
SNT	junio	2008	301.60	24.60	4.73	12.66	57.76	1.82	4.53	23.68	21.10	50.25	47.85
SNT	junio	2009	141.40	21.40	4.61	7.65	66.55	0.89	8.87	61.22	7.56	53.90	60.12
SNT	junio	2003	207.60	20.87	5.45	9.16	97.49	1.25	7.55	48.13	42.57	37.29	61.52
SNT	julio	2003	207.60	22.88	5.06	10.03	109.30	1.72	3.73	43.91	5.51	115.83	46.09
SNT	julio	2004	236.20	14.83	6.18	1.96	79.46	3.68	11.83	27.52	9.54	33.69	46.01
SNT	julio	2005	233.20	18.10	5.81	4.18	127.57	8.59	3.83	38.97	7.12	36.86	71.36
SNT	julio	2006	255.50	16.33	5.91	12.34	77.05	9.97	44.50	44.31	23.04	36.39	54.11
SNT	julio	2007	135.50	23.09	5.00	6.52	166.21	8.90	8.36	95.67	38.86	113.01	113.32
SNT	julio	2008	256.70	15.09	5.34	4.47	66.04	3.73	4.78	22.34	12.06	45.48	50.83
SNT	julio	2009	191.30	20.26	6.42	17.83	54.05	2.71	20.68	41.69	8.49	47.36	51.61
SNT	agosto	2004	365.40	23.63	4.82	0.32	83.27	1.63	5.24	35.00	0.03	19.03	28.38
SNT	agosto	2005	329.50	14.01	5.57	0.73	74.24	1.82	5.23	25.87	6.70	28.32	34.89
SNT	agosto	2006	359.10	19.30	4.75	0.41	55.46	0.56	4.01	53.85	10.82	29.35	72.75
SNT	agosto	2007	371.00	19.78	5.67	2.06	76.22	5.76	5.83	54.52	15.93	36.33	64.34
SNT	agosto	2008	206.10	27.20	4.52	7.66	83.20	5.52	10.36	33.71	18.66	63.84	79.71
SNT	agosto	2009	280.40	14.78	6.09	3.77	42.79	2.72	21.56	26.45	3.57	31.53	40.03
SNT	agosto	2003	240.70	17.76	5.33	17.98	87.82	1.67	4.98	69.25	2.50	28.28	48.78
SNT	septiembre	2004	307.70	15.20	5.30	0.64	72.06	3.70	11.89	22.58	3.11	18.41	21.99
SNT	septiembre	2005	246.50	11.33	5.60	2.66	33.23	0.44	2.61	20.41	4.78	28.50	32.09
SNT	septiembre	2006	296.40	13.90	5.75	0.81	90.78	4.43	3.74	35.34	5.48	31.21	65.86
SNT	septiembre	2007	184.00	12.00	5.34	3.31	112.73	2.60	4.99	56.91	11.62	39.13	75.32
SNT	septiembre	2008	223.20	13.83	5.70	1.74	38.87	5.68	10.65	15.34	6.00	22.10	29.60
SNT	septiembre	2009	244.70	20.60	4.69	0.85	53.39	1.38	2.52	9.03	1.22	39.63	38.65
SNT	septiembre	2003	285.30	13.46	6.68	18.74	54.33	1.24	4.44	33.76	10.62	28.38	39.30
SNT	octubre	2003	105.70	27.70	5.56	32.68	90.48	2.21	13.02	36.96	10.72	55.94	50.87
SNT	octubre	2004	79.20	32.41	4.80	0.11	147.41	0.26	0.82	92.78	6.65	41.58	43.87
SNT	octubre	2005	18.60	35.40	6.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.28	19.35	14.58
SNT	octubre	2006	52.90	25.20	5.13	15.22	97.78	8.70	9.05	90.00	8.76	26.13	69.79
SNT	octubre	2007	19.90	0.00	6.18	5.22	148.39	10.87	8.72	92.90	7.63	172.10	120.42
SNT	octubre	2008	159.90	14.53	6.23	94.96	67.77	9.88	17.53	21.34	83.20	50.64	29.23
SNT	octubre	2009	120.20	19.50	5.38	6.57	39.65	0.35	1.15	20.39	12.59	33.91	29.54
SNT	noviembre	2004	5.30	21.36	7.80	0.43	108.33	1.02	3.29	106.50	0.28	39.35	11.46

LLUVIA ÁCIDA EN LA ZMCM. EVALUACIÓN Y TRASCENDENCIA. ANEXO I

CLAVE		AÑO	vol. lluvia (mm)	POND.COND	PH POND	CONCENTRACION PONDERADA $\mu$ Eq/L							
						Na+	NH4-	K+	Mg2+	Ca+	[CL-]	[NO3-]	[SO4=]
COR	mayo	2004	23.10	35.28	6.79	1.91	204.63	10.10	32.50	76.92	134.16	71.64	94.47
COR	mayo	2005	3.90	92.80	6.64	14.35	28.89	34.78	46.91	265.50	24.29	122.42	307.92
COR	mayo	2006	50.70	30.76	5.22	1.46	140.18	1.20	4.81	41.22	15.85	74.95	118.63
COR	mayo	2007	47.40	53.44	6.32	9.52	219.16	5.85	12.86	137.48	20.98	155.01	228.72
COR	mayo	2008	23.30	44.88	6.55	11.62	150.20	7.82	14.67	59.26	19.81	86.83	100.30
COR	mayo	2009	24.10	39.67	6.76	9.06	198.21	4.99	10.22	91.31	11.21	109.06	112.38
COR	junio	2004	137.50	21.18	6.67	2.16	110.60	1.87	6.02	36.68	6.55	39.16	43.53
COR	junio	2005	73.40	28.55	5.81	0.78	181.90	1.58	5.09	47.40	7.36	30.68	84.52
COR	junio	2006	96.30	15.24	5.81	0.39	91.48	0.41	4.15	23.38	13.93	26.64	60.51
COR	junio	2007	70.00	43.59	4.49	10.11	171.60	7.46	13.80	129.51	12.85	104.21	155.03
COR	junio	2008	108.10	35.56	4.50	2.30	83.96	8.54	14.27	16.10	26.36	60.25	69.65
COR	junio	2009	46.40	27.33	6.52	9.29	88.39	1.71	11.94	60.28	10.15	73.33	70.31
COR	junio	2003	108.00	16.52	7.06	8.19	100.63	1.88	1.46	21.57	13.06	35.71	41.44
COR	julio	2004	81.10	20.71	6.75	1.29	82.04	1.84	5.91	17.07	8.46	42.53	45.30
COR	julio	2005	108.80	16.20	6.00	1.49	101.61	0.93	4.28	29.00	7.70	27.34	55.07
COR	julio	2006	129.10	17.29	6.61	9.08	90.83	18.79	39.95	46.69	22.35	55.45	92.00
COR	julio	2007	102.50	16.95	6.19	7.96	73.70	5.13	7.41	28.40	7.35	39.17	81.81
COR	julio	2008	155.10	18.45	5.45	4.31	67.42	4.60	7.48	29.61	15.80	40.15	52.33
COR	julio	2009	64.10	15.51	5.53	4.39	33.82	0.68	7.03	53.89	5.90	41.05	44.05
COR	julio	2003	115.20	19.51	6.76	7.16	91.47	0.26	4.06	49.34	15.72	51.22	57.73
COR	agosto	2004	169.60	16.20	6.39	0.32	69.36	0.44	1.41	23.68	22.94	17.09	16.08
COR	agosto	2005	155.90	14.56	5.44	0.31	94.49	0.43	0.11	10.41	6.14	25.31	47.42
COR	agosto	2006	187.80	15.83	5.38	0.91	80.09	2.91	1.54	59.18	23.02	29.09	76.44
COR	agosto	2007	114.20	10.61	5.97	1.74	112.28	1.28	4.47	20.82	3.57	14.30	53.64
COR	agosto	2008	123.90	17.44	5.46	5.32	68.75	5.68	10.66	27.12	14.34	40.98	54.47
COR	agosto	2009	99.20	23.66	5.29	11.89	62.43	6.31	34.97	55.13	11.05	52.24	62.12
COR	agosto	2003	182.50	24.49	6.50	11.13	100.03	1.94	34.52	66.58	47.54	53.48	81.64
COR	septiembre	2004	54.60	17.07	5.83	2.99	88.71	7.29	23.45	18.31	2.67	24.42	57.20
COR	septiembre	2005	41.20	21.92	6.81	2.82	90.86	3.51	6.14	34.26	2.46	44.80	78.42
COR	septiembre	2006	118.50	23.21	4.99	0.75	98.08	1.40	0.48	40.70	14.65	41.36	64.40
COR	septiembre	2007	71.00	3.60	5.26	1.74	153.87	2.13	5.55	32.57	15.74	40.56	84.87
COR	septiembre	2008	77.60	19.31	5.84	5.45	70.48	7.29	13.68	27.81	8.48	34.43	54.55
COR	septiembre	2009	39.70	11.74	5.38	0.82	57.71	0.57	1.55	3.32	1.25	32.78	32.07
COR	septiembre	2003	161.90	17.60	6.35	20.91	67.46	2.22	11.25	32.28	9.32	43.56	49.55
COR	octubre	2004	36.50	26.32	5.83	0.27	140.53	0.26	0.82	111.78	12.02	25.82	37.65
COR	octubre	2005	62.90	21.93	5.26	58.04	44.31	0.88	5.99	13.23	34.86	18.55	31.59
COR	octubre	2006	19.40	14.40	5.18	0.43	105.56	1.53	0.82	42.00	43.22	19.52	70.63
COR	octubre	2007	12.10	20.44	6.14	4.62	145.42	2.29	8.04	41.38	8.23	24.42	42.35
COR	octubre	2009	71.70	20.17	6.10	21.75	77.82	1.39	6.86	36.53	18.53	26.44	77.75
COR	octubre	2003	48.80	19.85	7.06	11.08	130.82	2.98	9.28	63.86	11.53	36.42	39.45

LLUVIA ÁCIDA EN LA ZMCM. EVALUACIÓN Y TRASCENDENCIA. ANEXO I

CLAVE		AÑO	vol. lluvia (mm)	POND.COND	PH POND	CONCENTRACION PONDERADA $\mu$ Eq/L							
						Na+	NH4-	K+	Mg2+	Ca+	[CL-]	[NO3-]	[SO4=]
MPA	mayo	2004	39.60	35.12	6.30	1.44	161.52	5.77	18.56	71.55	3.38	63.07	76.95
MPA	mayo	2005	81.20	20.82	6.00	0.19	131.23	3.67	3.00	36.91	13.42	33.88	54.99
MPA	mayo	2006	41.80	27.45	5.18	1.99	140.45	1.51	4.76	47.46	12.75	75.93	94.10
MPA	mayo	2007	33.30	53.49	6.53	28.45	202.35	7.31	18.48	150.37	16.71	147.05	156.45
MPA	mayo	2008	20.90	61.15	6.13	53.99	322.53	29.36	68.45	112.27	57.63	228.80	325.56
MPA	mayo	2009	52.20	36.13	6.88	8.67	158.97	5.32	8.48	78.35	9.22	83.86	85.09
MPA	junio	2004	170.80	16.47	5.82	0.63	61.51	2.08	6.68	12.89	9.46	36.72	44.29
MPA	junio	2005	98.70	23.10	5.23	2.96	92.17	1.17	5.85	25.72	7.29	34.82	74.64
MPA	junio	2006	79.40	20.50	5.67	2.89	92.53	4.65	6.71	57.30	23.40	42.60	81.15
MPA	junio	2007	41.40	51.86	4.22	17.55	196.09	11.70	17.35	102.47	60.29	152.59	147.27
MPA	junio	2008	98.00	26.45	4.78	6.42	66.42	1.25	2.78	28.12	7.89	66.23	59.50
MPA	junio	2009	83.80	22.80	5.51	15.30	61.74	1.17	5.23	69.99	13.78	53.13	64.83
MPA	junio	2003	118.40	19.40	6.61	5.92	114.80	1.28	6.79	31.40	37.25	42.25	59.57
MPA	julio	2004	107.20	19.19	6.06	3.63	81.54	9.18	29.55	27.11	10.11	42.86	51.72
MPA	julio	2005	156.80	16.88	4.93	0.43	76.92	1.62	0.97	16.25	12.61	38.50	42.31
MPA	julio	2006	67.70	15.93	6.21	3.18	98.09	17.24	28.54	61.21	21.49	39.46	71.42
MPA	julio	2007	90.90	20.45	6.06	6.15	107.40	5.66	33.21	40.94	11.20	85.33	101.14
MPA	julio	2008	134.00	19.79	5.22	5.32	68.77	4.56	6.27	30.53	14.60	51.16	46.69
MPA	julio	2009	53.80	23.78	6.07	12.42	65.54	1.55	10.06	70.47	19.30	53.60	68.16
MPA	julio	2003	148.60	19.30	6.63	14.99	94.60	1.67	4.82	31.45	22.37	40.96	56.51
MPA	agosto	2003	84.50	13.16	6.88	19.48	47.86	3.65	10.83	47.66	2.56	11.06	38.75
MPA	agosto	2004	127.10	20.34	5.37	0.35	59.91	2.17	6.98	20.45	1.24	19.53	20.56
MPA	agosto	2005	31.40	16.35	5.40	2.77	91.63	2.91	5.43	25.60	7.90	28.61	73.59
MPA	agosto	2006	116.90	17.54	5.23	0.95	89.14	1.95	1.86	62.11	25.03	35.75	66.62
MPA	agosto	2007	124.60	21.01	5.94	3.03	94.52	4.48	6.62	37.97	17.59	48.38	40.61
MPA	agosto	2008	136.20	25.10	4.83	7.64	98.68	8.21	15.42	38.93	22.43	74.15	72.69
MPA	agosto	2009	144.30	14.14	5.73	8.56	48.73	2.82	21.55	19.97	8.56	31.51	45.40
MPA	septiembre	2004	140.80	12.73	6.15	3.28	260.79	11.31	36.40	90.95	18.74	52.40	50.92
MPA	septiembre	2005	80.90	8.34	6.40	3.25	40.01	4.16	3.90	6.42	0.97	17.64	7.54
MPA	septiembre	2006	165.40	23.97	4.81	1.52	89.94	1.35	1.12	37.80	10.51	36.33	63.77
MPA	septiembre	2007	101.50	12.05	5.24	5.26	146.64	4.80	8.75	55.30	24.13	23.88	90.89
MPA	septiembre	2008	85.90	17.81	6.72	5.61	72.52	6.51	12.23	28.61	6.82	30.40	37.59
MPA	septiembre	2009	165.80	21.48	5.01	0.00	60.92	1.36	0.00	9.29	7.04	35.22	52.27
MPA	septiembre	2003	109.40	15.24	6.40	21.00	53.41	3.69	25.49	32.51	8.15	65.27	37.25
MPA	octubre	2006	30.10	12.85	5.17	0.43	65.56	7.67	0.82	52.50	4.52	32.58	78.33
MPA	octubre	2007	38.20	11.83	6.24	27.46	86.76	5.51	24.36	73.46	14.15	57.62	68.57
MPA	octubre	2008	30.70	18.87	6.68	21.63	41.92	5.97	15.45	32.74	22.26	15.45	37.72
MPA	octubre	2009	75.00	21.17	5.42	2.83	69.70	0.47	1.17	17.84	3.44	26.96	55.50
MPA	octubre	2003	81.60	26.03	6.99	15.15	134.99	2.22	4.12	39.89	8.86	44.96	61.03
MPA	noviembre	2004	10.50	8.18	4.79	0.43	4.44	6.14	19.75	22.00	0.28	7.58	0.00

**ANEXO 2**

**VALORES DE pH PONDERADO**

**$\leq 5.6$**

EVENTOS DE DEPOSITO HÚMEDOS COLECTADOS EN LA ZMCM CON VALOR DE pH ≤ 5.6 EN EL PERIODO DE ESTUDIO 2003-2009.

VALORES PONDERADOS POR MES < a 5.6 ZONA NORESTE

CHA	octubre	2004	5.39
	septiembre	2005	5.28
	mayo	2006	5.31
	agosto	2006	4.04
	junio	2007	5.43
	julio	2007	5.55
	septiembre	2007	5.09
	octubre	2007	5.29
	junio	2008	4.74
	octubre	2009	5.52
XAL	octubre	2005	5.46
	mayo	2006	5.51
	septiembre	2006	4.93
	junio	2007	4.90
	octubre	2007	5.33
septiembre	2009	5.25	

NTS	octubre	2004	5.41
	junio	2006	5.14
	septiembre	2006	5.03
	junio	2007	4.83
	junio	2008	4.76
	septiembre	2008	5.47
	agosto	2009	5.46
	septiembre	2009	4.88
TEC	septiembre	2004	5.55
	octubre	2004	4.85
	octubre	2005	5.14
	mayo	2006	5.48
	septiembre	2006	4.18
	junio	2007	4.59
	junio	2008	5.24
septiembre	2009	4.71	

VALORES PONDERADOS POR MES < a 5.6 ZONA NOROESTE

IBM	septiembre	2003	5.45
	mayo	2004	5.55
	octubre	2004	4.80
	julio	2005	5.43
	octubre	2005	5.19
	mayo	2006	4.79
	junio	2006	5.34
	septiembre	2006	4.90
	mayo	2007	5.06
	junio	2007	4.61
	octubre	2007	5.17
	junio	2008	5.59
	julio	2008	5.01
	agosto	2008	5.30
	septiembre	2008	5.23
	septiembre	2009	4.64
	octubre	2009	4.83

LAA	octubre	2003	5.43
	mayo	2004	5.58
	septiembre	2004	5.29
	octubre	2004	5.25
	noviembre	2004	4.73
	octubre	2005	5.32
	mayo	2006	5.16
	junio	2006	4.75
	agosto	2006	5.31
	septiembre	2006	4.80
	junio	2007	4.75
	mayo	2008	5.32
	junio	2008	4.83
	agosto	2008	5.32
	septiembre	2009	4.83
	octubre	2009	5.34

MCM	septiembre	2003	5.29
	mayo	2004	5.28
	octubre	2004	4.76
	mayo	2006	5.20
	septiembre	2006	4.73
	junio	2007	4.59
	octubre	2007	5.55
	julio	2008	5.27
	agosto	2008	5.42
	mayo	2009	3.21
	septiembre	2009	5.11

TLA	junio	2004	5.43
	septiembre	2004	5.23
	octubre	2004	5.30
	agosto	2005	5.52
	octubre	2005	5.24
	mayo	2006	5.11
	junio	2006	5.07
	agosto	2006	5.04
	septiembre	2006	4.90
	junio	2007	4.39
	julio	2008	5.19
	agosto	2008	5.02
	septiembre	2008	5.13
	septiembre	2009	4.89

LLUVIA ÁCIDA EN LA ZMCM. EVALUACIÓN Y TRASCENDENCIA. ANEXO 2

VALORES PONDERADOS POR MES < a 5.6 ZONA SUROESTE

PAR	junio	2003	5.45
PAR	agosto	2003	5.47
PAR	mayo	2004	4.72
PAR	junio	2004	4.81
PAR	agosto	2004	5.35
PAR	septiembre	2004	5.39
PAR	octubre	2004	4.84
PAR	mayo	2005	5.24
PAR	julio	2005	4.94
PAR	agosto	2005	5.01
PAR	mayo	2006	4.92
PAR	junio	2006	5.03
PAR	julio	2006	5.24
PAR	agosto	2006	3.77
PAR	septiembre	2006	4.79
PAR	mayo	2007	5.05
PAR	junio	2007	4.14
PAR	julio	2007	4.60
PAR	agosto	2007	4.95
PAR	septiembre	2007	4.97
PAR	octubre	2007	5.14
PAR	mayo	2008	4.99
PAR	junio	2008	4.70
PAR	julio	2008	5.02
PAR	agosto	2008	4.32
PAR	septiembre	2008	5.35
PAR	mayo	2009	5.55
PAR	junio	2009	5.31
PAR	julio	2009	5.46
PAR	agosto	2009	5.36
PAR	septiembre	2009	4.67
PAR	octubre	2009	5.51

EAJ	agosto	2003	5.31
EAJ	octubre	2003	5.09
EAJ	mayo	2004	4.55
EAJ	junio	2004	5.42
EAJ	agosto	2004	5.12
EAJ	septiembre	2004	5.25
EAJ	octubre	2004	4.43
EAJ	julio	2005	5.25
EAJ	octubre	2005	5.25
EAJ	mayo	2006	4.92
EAJ	junio	2006	5.29
EAJ	agosto	2006	5.04
EAJ	mayo	2007	5.47
EAJ	junio	2007	4.34
EAJ	julio	2007	5.43
EAJ	agosto	2007	5.40
EAJ	septiembre	2007	5.16
EAJ	octubre	2007	4.60
EAJ	junio	2008	4.71
EAJ	julio	2008	5.33
EAJ	agosto	2008	4.71
EAJ	septiembre	2009	4.56
EAJ	octubre	2009	4.92

DIC	junio	2004	5.39
DIC	septiembre	2004	5.37
DIC	octubre	2004	4.82
DIC	julio	2005	5.52
DIC	septiembre	2005	5.39
DIC	mayo	2006	5.04
DIC	agosto	2006	4.97
DIC	junio	2007	4.58
DIC	agosto	2007	5.59
DIC	octubre	2007	4.87
DIC	junio	2008	5.00
DIC	julio	2008	5.07
DIC	agosto	2008	5.09
DIC	septiembre	2008	5.23
DIC	octubre	2008	5.19
DIC	septiembre	2009	4.73
DIC	octubre	2009	5.18

SNT	junio	2003	5.45
SNT	julio	2003	5.06
SNT	agosto	2003	5.33
SNT	octubre	2003	5.56
SNT	mayo	2004	5.27
SNT	junio	2004	4.81
SNT	agosto	2004	4.82
SNT	septiembre	2004	5.30
SNT	octubre	2004	4.80
SNT	mayo	2005	4.91
SNT	junio	2005	5.42
SNT	agosto	2005	5.57
SNT	septiembre	2005	5.60
SNT	mayo	2006	4.84
SNT	junio	2006	4.49
SNT	agosto	2006	4.75
SNT	octubre	2006	5.13
SNT	mayo	2007	5.44
SNT	junio	2007	4.69
SNT	julio	2007	5.00
SNT	septiembre	2007	5.34
SNT	mayo	2008	4.95
SNT	junio	2008	4.73
SNT	julio	2008	5.34
SNT	agosto	2008	4.52
SNT	junio	2009	4.61
SNT	septiembre	2009	4.69
SNT	octubre	2009	5.38

EDL	agosto	2003	5.56
EDL	octubre	2003	5.08
EDL	mayo	2004	5.16
EDL	junio	2004	5.33
EDL	julio	2004	5.20
EDL	septiembre	2004	5.15
EDL	octubre	2004	4.48
EDL	junio	2005	5.53
EDL	agosto	2005	5.15
EDL	octubre	2005	4.60
EDL	mayo	2006	4.66
EDL	junio	2006	4.84
EDL	agosto	2006	4.35
EDL	septiembre	2006	5.37
EDL	octubre	2006	5.42
EDL	mayo	2007	5.07
EDL	junio	2007	4.36
EDL	julio	2007	5.08
EDL	agosto	2007	5.32
EDL	septiembre	2007	5.05
EDL	octubre	2007	5.30
EDL	junio	2008	5.43
EDL	julio	2008	5.13
EDL	agosto	2008	4.75
EDL	mayo	2009	5.51
EDL	septiembre	2009	4.80
EDL	octubre	2009	5.14

LOM	septiembre	2003	5.07
LOM	mayo	2004	5.27
LOM	junio	2004	4.79
LOM	octubre	2004	4.62
LOM	julio	2005	5.14
LOM	agosto	2005	5.26
LOM	octubre	2005	5.42
LOM	mayo	2006	5.25
LOM	junio	2006	5.40
LOM	agosto	2006	3.63
LOM	junio	2007	4.79
LOM	julio	2007	5.15
LOM	agosto	2007	5.20
LOM	septiembre	2007	5.36
LOM	octubre	2007	4.83
LOM	julio	2008	0.51
LOM	mayo	2009	4.75
LOM	septiembre	2009	4.78
LOM	octubre	2009	5.30

LLUVIA ÁCIDA EN LA ZMCM. EVALUACIÓN Y TRASCENDENCIA. ANEXO 2

VALORES PONDERADOS POR MES < a 5.6 ZONA SURESTE

COR	agosto	2005	5.44
	octubre	2005	5.26
	mayo	2006	5.22
	agosto	2006	5.38
	septiembre	2006	4.99
	octubre	2006	5.18
	junio	2007	4.49
	septiembre	2007	5.26
	junio	2008	4.50
	julio	2008	5.45
	agosto	2008	5.46
	julio	2009	5.53
	agosto	2009	5.29
	septiembre	2009	5.38

MPA	agosto	2004	5.37
	noviembre	2004	4.79
	junio	2005	5.23
	julio	2005	4.93
	agosto	2005	5.40
	mayo	2006	5.18
	agosto	2006	5.23
	septiembre	2006	4.81
	octubre	2006	5.17
	junio	2007	4.22
	septiembre	2007	5.24
	junio	2008	4.78
	julio	2008	5.22
	agosto	2008	4.83
	junio	2009	5.51
	septiembre	2009	5.01
	octubre	2009	5.42



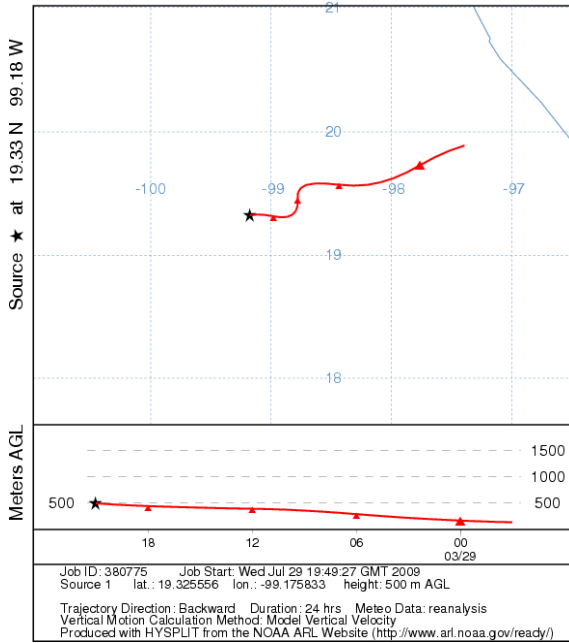
**ANEXO 3**

**TRAYECTORIAS DE RETROCESO**

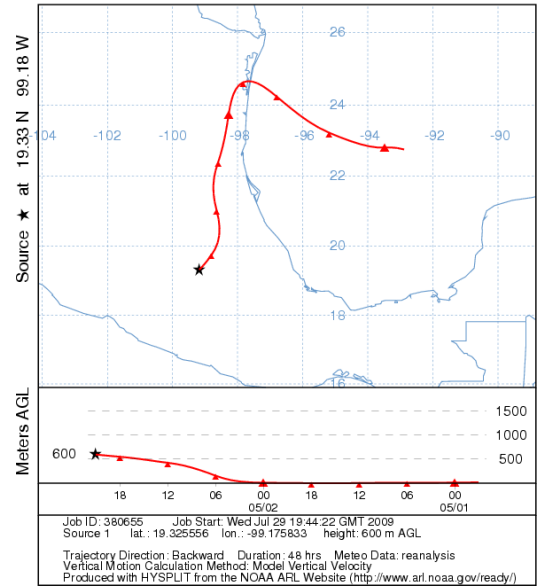
**POR EVENTO**

LLUVIA ÁCIDA EN LA ZMCM. EVALUACIÓN Y TRASCENDENCIA. ANEXO 3

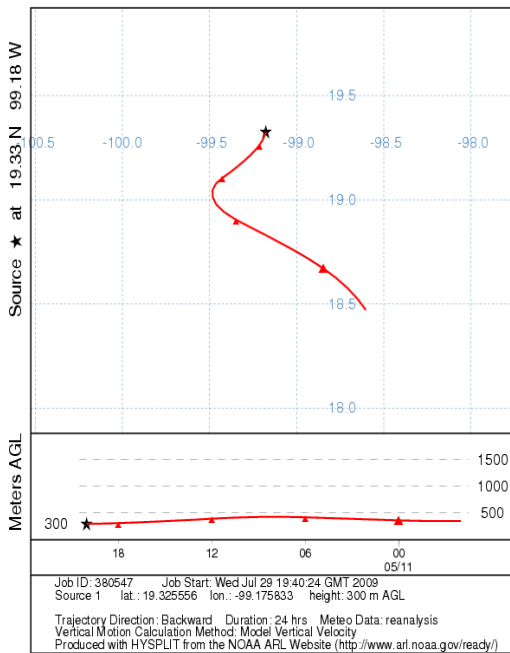
NOAA HYSPLIT MODEL  
Backward trajectory ending at 2100 UTC 29 Mar 04  
CDC1 Meteorological Data



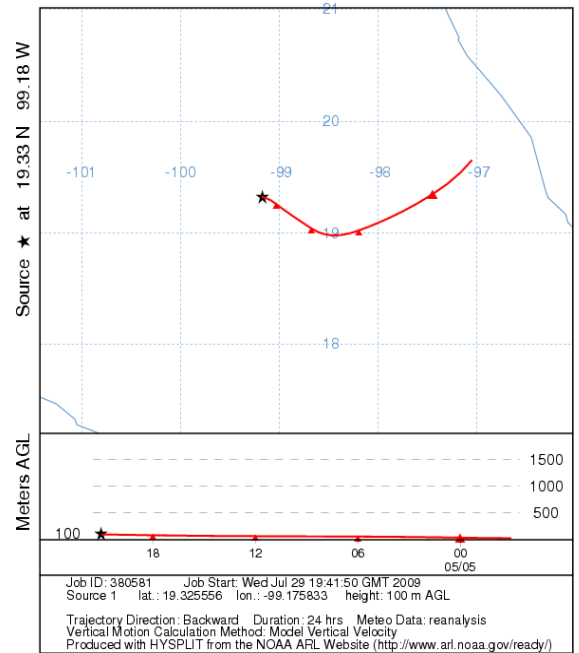
NOAA HYSPLIT MODEL  
Backward trajectory ending at 2100 UTC 02 May 04  
CDC1 Meteorological Data



NOAA HYSPLIT MODEL  
Backward trajectory ending at 2000 UTC 11 May 04  
CDC1 Meteorological Data

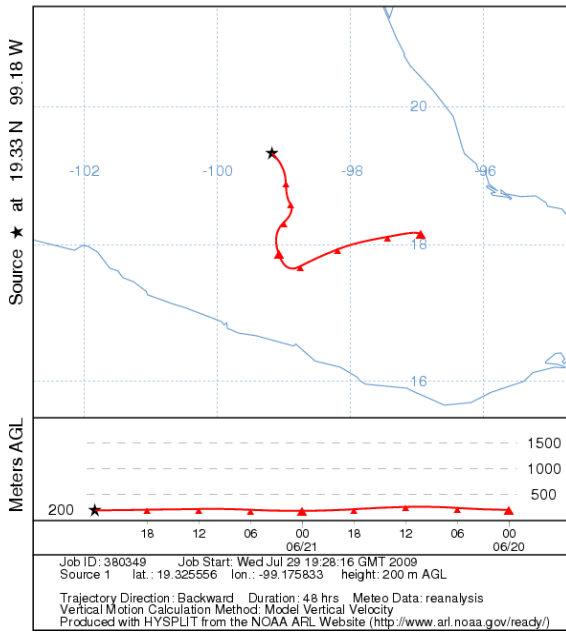


NOAA HYSPLIT MODEL  
Backward trajectory ending at 2100 UTC 05 May 04  
CDC1 Meteorological Data

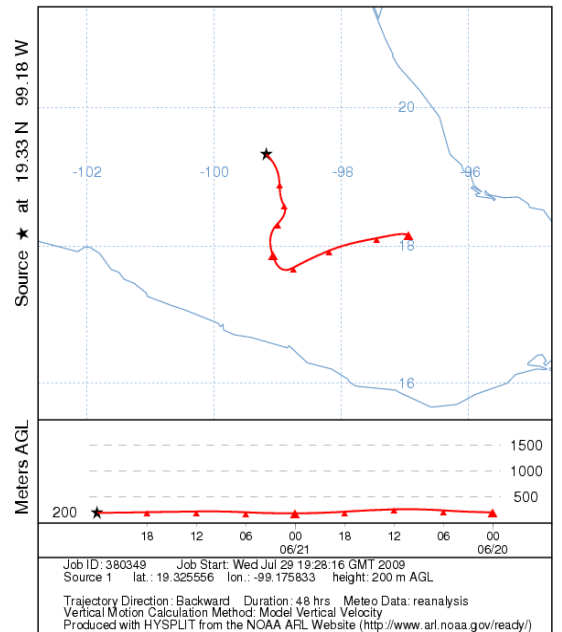


LLUVIA ÁCIDA EN LA ZMCM. EVALUACIÓN Y TRASCENDENCIA. ANEXO 3

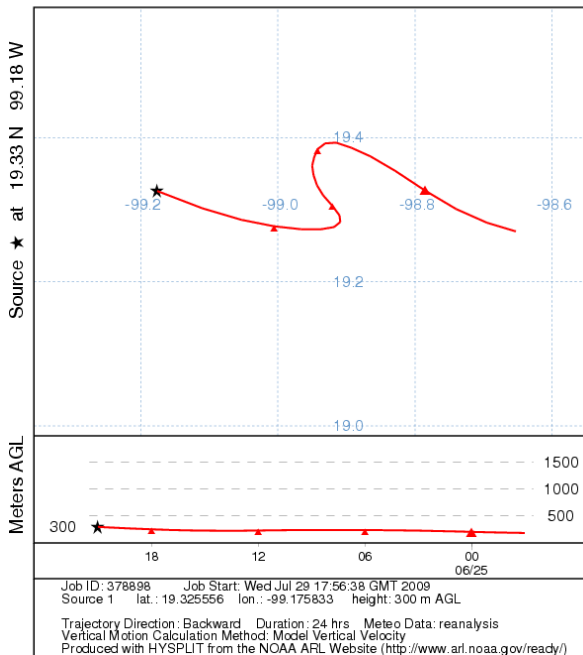
NOAA HYSPLIT MODEL  
Backward trajectory ending at 0000 UTC 22 Jun 04  
CDC1 Meteorological Data



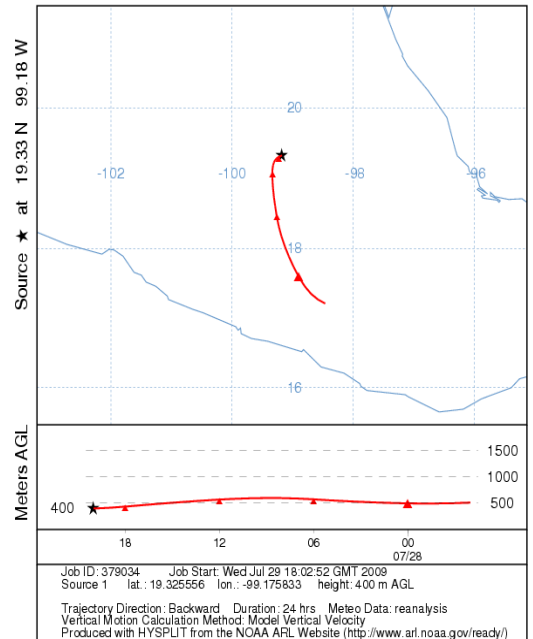
NOAA HYSPLIT MODEL  
Backward trajectory ending at 0000 UTC 22 Jun 04  
CDC1 Meteorological Data



NOAA HYSPLIT MODEL  
Backward trajectory ending at 2100 UTC 25 Jun 04  
CDC1 Meteorological Data

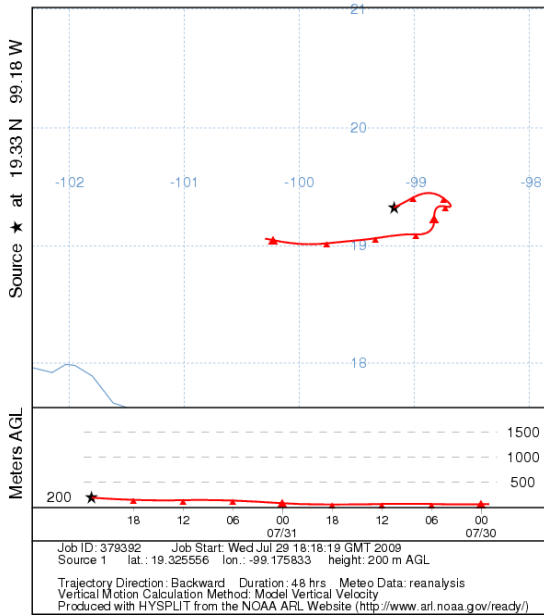


NOAA HYSPLIT MODEL  
Backward trajectory ending at 2000 UTC 28 Jul 04  
CDC1 Meteorological Data

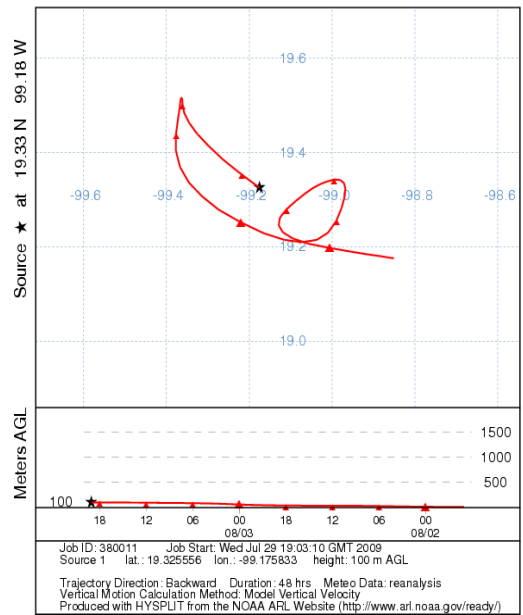


LLUVIA ÁCIDA EN LA ZMCM. EVALUACIÓN Y TRASCENDENCIA. ANEXO 3

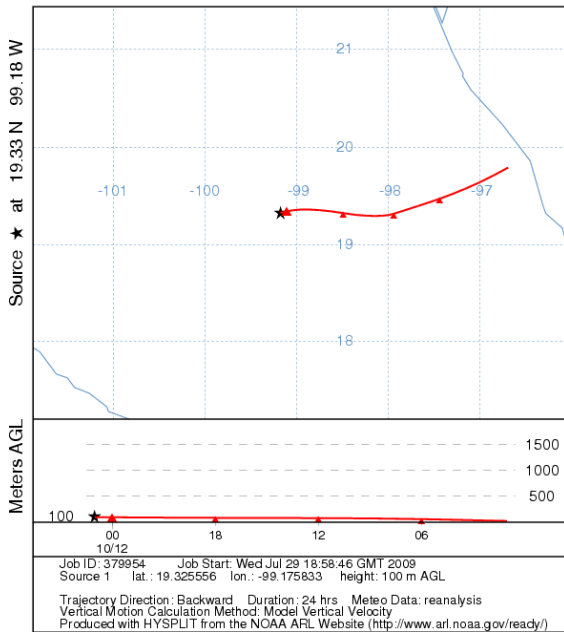
NOAA HYSPLIT MODEL  
Backward trajectory ending at 2300 UTC 31 Jul 04  
CDC1 Meteorological Data



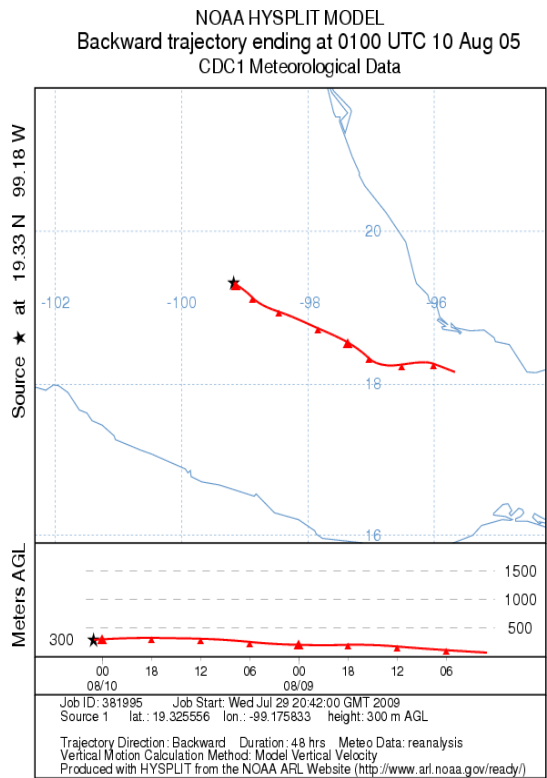
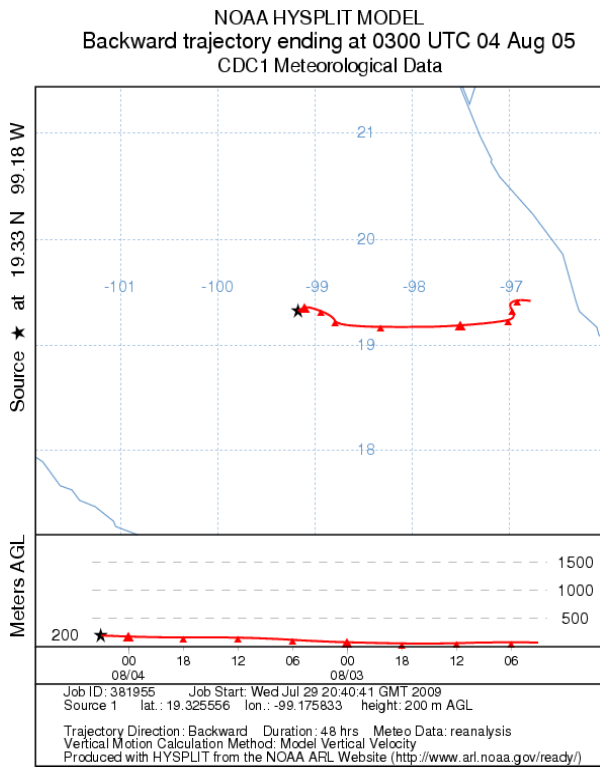
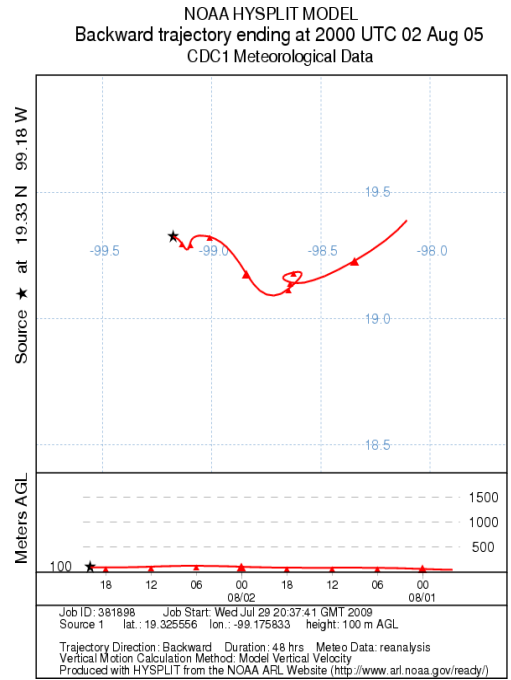
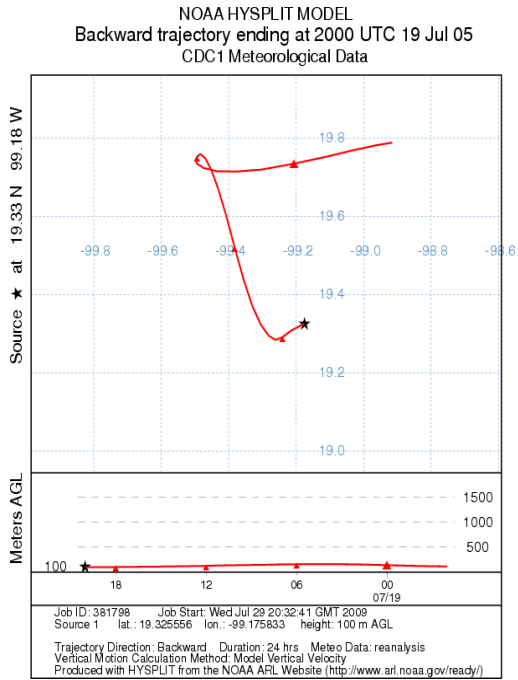
NOAA HYSPLIT MODEL  
Backward trajectory ending at 1900 UTC 03 Aug 04  
CDC1 Meteorological Data



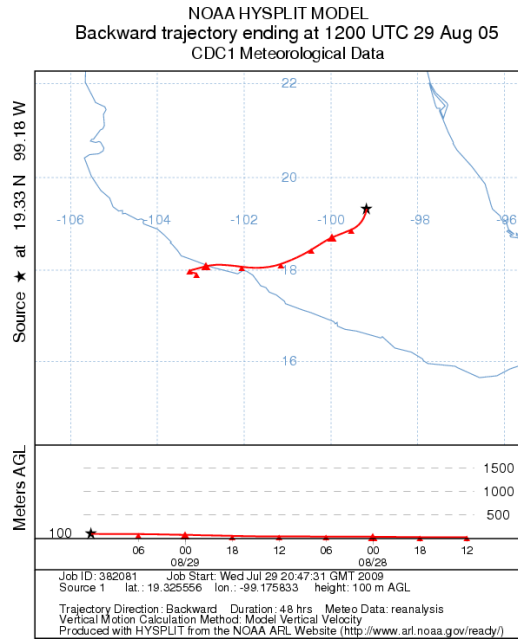
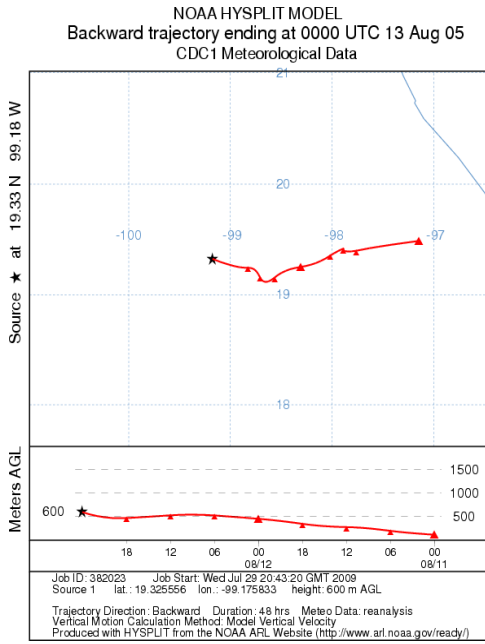
NOAA HYSPLIT MODEL  
Backward trajectory ending at 0100 UTC 12 Oct 04  
CDC1 Meteorological Data



LLUVIA ÁCIDA EN LA ZMCM. EVALUACIÓN Y TRASCENDENCIA. ANEXO 3



LLUVIA ÁCIDA EN LA ZMCM. EVALUACIÓN Y TRASCENDENCIA. ANEXO 3



**ANEXO 4**  
**ANÁLISIS DE COMPONENTES**  
**PRINCIPALES POR REGIÓN**

## ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES POR REGIÓN DE ESTUDIO

### REGIÓN NORESTE

Para la región Noreste, se analizaron 576 datos de depósito húmedo, se elaboró una matriz con los parámetros de pH, conductividad, y concentraciones iónicas ( $\mu\text{Eq/L}$ ) de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  separando los eventos por volumen de lluvia y año del evento, lo que da una matriz de (12,576).

En la tabla 1 y2, se muestran los valores de correlación de éstos parámetros distribuidos en 4 componentes, los cuales explican el 69.60% de los datos.

A continuación se describen los componentes principales:

El primer componente explica la relación de conductividad,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{HCO}_3^-$  como iones y contraponos mayoritarios.

El segundo componente, relaciona el  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , y  $\text{Mg}^{2+}$ , los cuales son iones residuales de combustión a elevadas temperaturas.

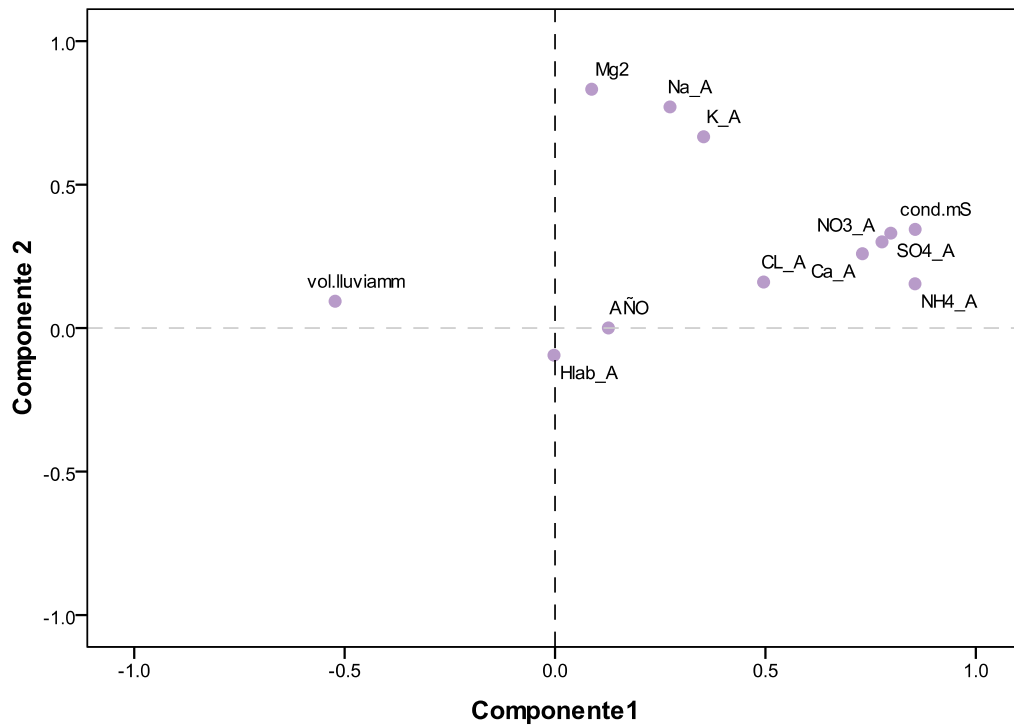
El tercer componente, explica la variación anual de  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , los cuales son subproductos de la lluvia ácida

El cuarto componente relaciona la concentración de los iones  $\text{H}^+$  con el volumen de lluvia

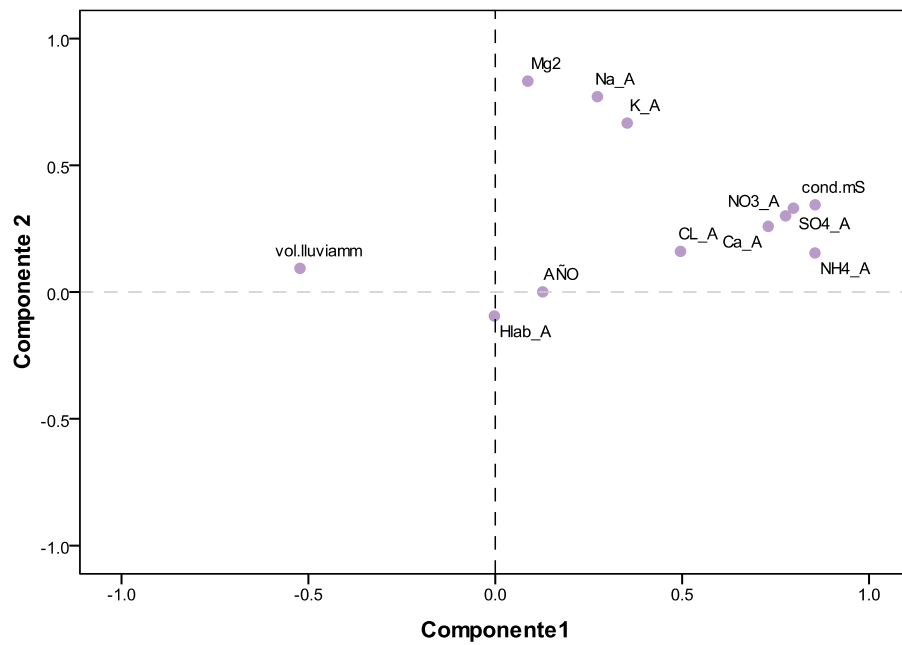
	Componente			
	1	2	3	4
cond. (mS)	0.86	0.34	0.11	0.13
$\text{NH}_4^-$	0.86	0.15	0.00	-0.03
$[\text{SO}_4^-]$	0.80	0.33	0.22	0.02
$[\text{NO}_3^-]$	0.78	0.30	0.33	0.02
$\text{Ca}^{2+}$	0.73	0.26	-0.08	-0.01
$\text{HCO}_3^-$	0.70	0.41	0.03	0.04
$[\text{CL}^-]$	0.50	0.16	-0.40	0.30
$\text{K}^+$	0.35	0.67	0.13	-0.07
$\text{Na}^+$	0.27	0.77	-0.14	0.06
AÑO	0.13	0.00	0.86	0.10
$\text{Mg}^{2+}$	0.09	0.83	0.00	-0.06
$[\text{H}^+]$ lab	0.00	-0.09	0.05	0.91
vol. lluvia (mm)	-0.52	0.09	0.15	0.31



REGIÓN NORESTE



REGIÓN NORESTE



## REGION NOROESTE

Para la región Noroeste, se analizaron 450 datos de depósito húmedo, se elaboró una matriz con los parámetros de pH, conductividad, y concentraciones iónicas ( $\mu\text{Eq/L}$ ) de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$   $\text{HCO}_3^-$  separando los eventos por volumen de lluvia y año del evento, lo que da una matriz de (12,450).

En la tabla 1, se muestran los valores de correlación de éstos parámetros distribuidos en 4 componentes, los cuales explican el 67.94% de los datos.

Como se observa en la tabla 2, se describen 4 componentes principales:

El primer componente explica la relación de conductividad,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ , como iones mayoritarios.

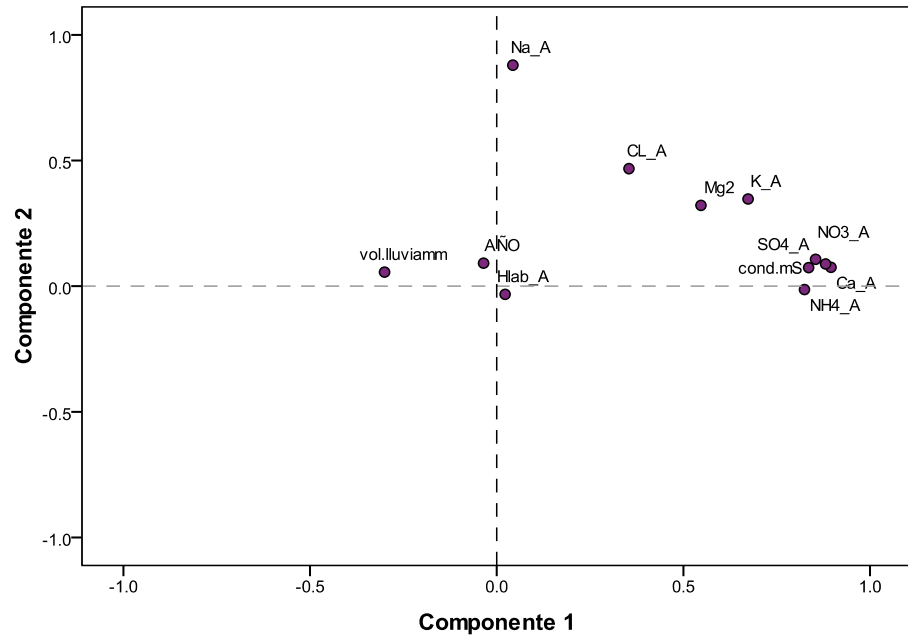
El segundo componente, relaciona el  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , y  $\text{Mg}^{2+}$ , los cuales son iones residuales cuyo origen son partículas de suelo o bien subproductos de la combustión a elevadas temperaturas.

El tercer componente, esta integrado por  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$ , los cuales son aerosoles marinos.

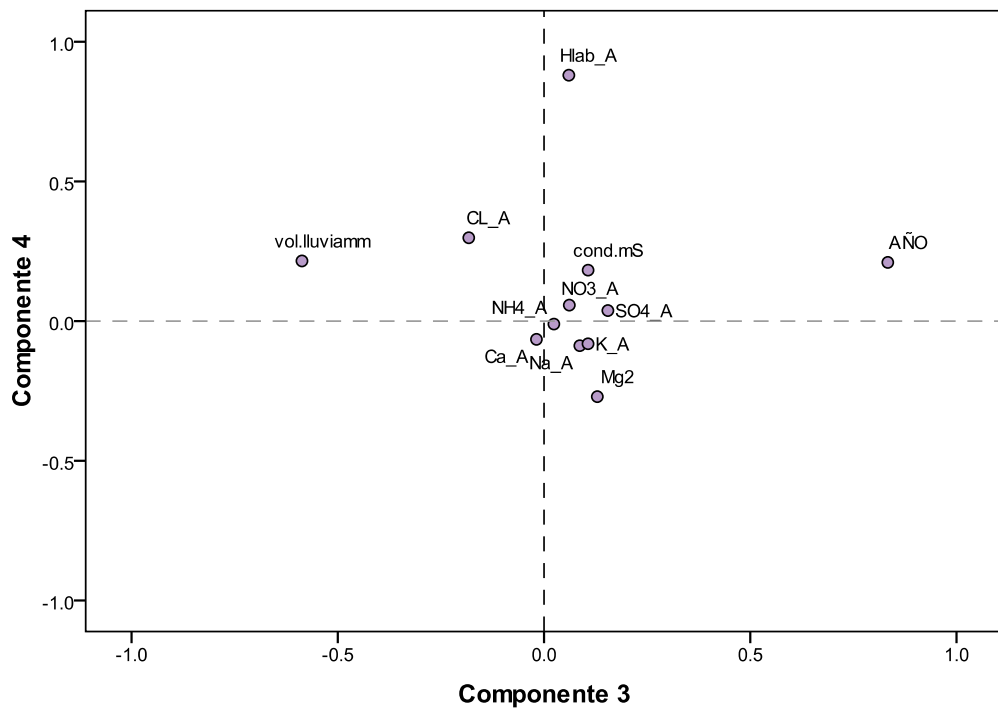
El cuarto componente relaciona la concentración de los iones  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  con el año en el cual se obtuvieron las muestras y su acidez.

	Componente			
	1	2	3	4
$\text{Ca}^{2+}$	0.90	0.08	-0.02	-0.07
[ $\text{NO}_3^-$ ]	0.88	0.09	0.06	0.06
[ $\text{SO}_4^{2-}$ ]	0.85	0.11	0.16	0.04
cond. (mS)	0.84	0.07	0.11	0.18
$\text{NH}_4^+$	0.83	-0.01	0.02	-0.01
$\text{HCO}_3^-$	0.67	0.71	0.10	0.03
$\text{K}^+$	0.67	0.35	0.11	-0.08
$\text{Mg}^{2+}$	0.55	0.32	0.13	-0.27
[ $\text{Cl}^-$ ]	0.35	0.47	-0.18	0.30
$\text{Na}^+$	0.04	0.88	0.09	-0.09
[ $\text{H}^+$ ] lab	0.02	-0.03	0.06	0.88
AÑO	-0.04	0.09	0.83	0.21
vol. lluvia (mm)	-0.30	0.06	-0.59	0.22

REGION NOROESTE



REGION NOROESTE



## REGIÓN CENTRO

De la región Centro, se analizaron 153 datos de depósito húmedo, se elaboró una matriz con los parámetros de pH, conductividad, y concentraciones iónicas ( $\mu\text{Eq/L}$ ) de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  separando los eventos por volumen de lluvia y año del evento, lo que da una matriz de (11,153).

En la tabla 1, se muestran los valores de correlación de éstos parámetros distribuidos en 3 componentes, los cuales explican el 57.34% de los datos.

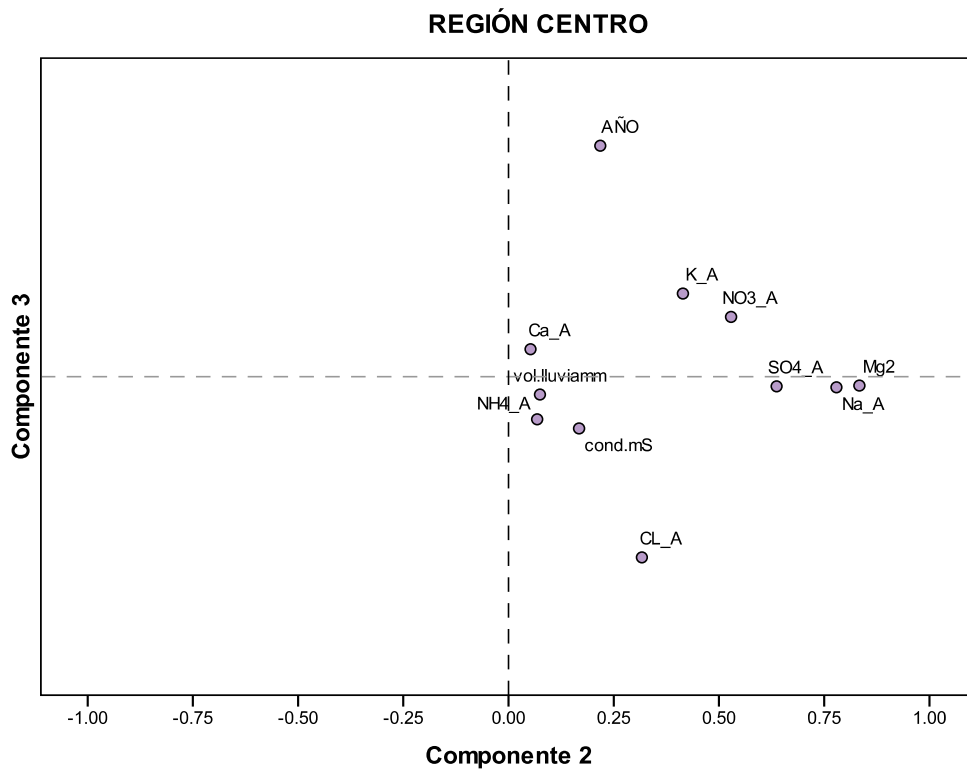
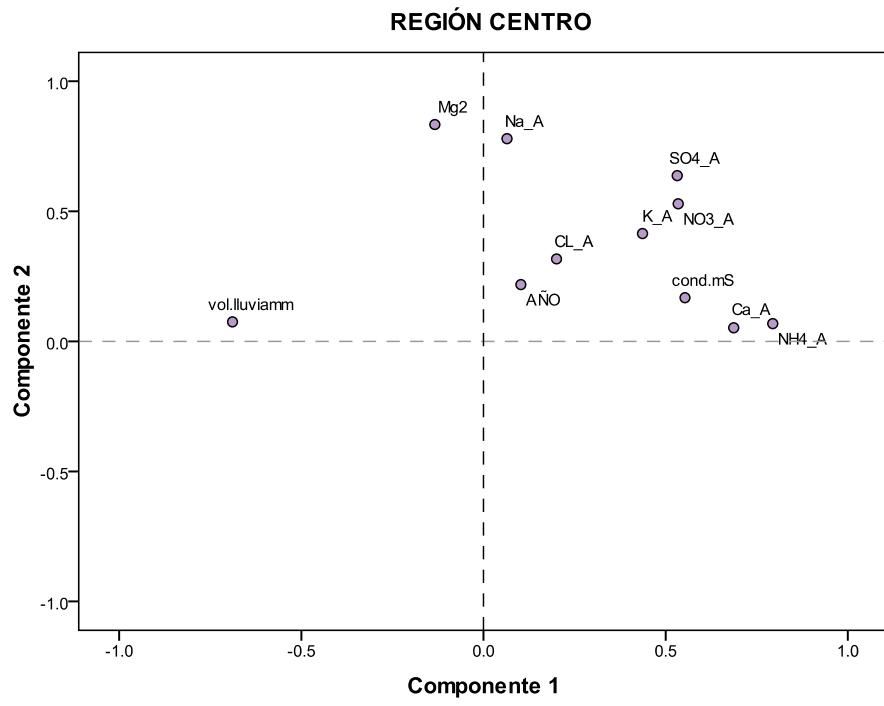
Como se observa en la tabla 2, se describen 4 componentes principales:

El primer componente explica la relación de conductividad,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ , como iones mayoritarios.

El segundo componente, relaciona el  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , iones ácidos de origen antropogénico producto de la combustión de energéticos fósiles.

El tercer componente, describe la variación anual de  $\text{K}^+$  y  $\text{Cl}^-$ , dicha relación sugiere la quema de fuegos artificiales, municiones, cápsulas fulminantes, explosivos primarios, etc.

	Componente		
	1	2	3
$\text{NH}_4^-$	0.79	0.07	-0.15
$\text{Ca}^+$	0.69	0.05	0.10
cond. (mS)	0.55	0.17	-0.18
$[\text{NO}_3^-]$	0.53	0.53	0.21
$[\text{SO}_4^{2-}]$	0.53	0.64	-0.03
$\text{K}^+$	0.44	0.41	0.29
$[\text{Cl}^-]$	0.20	0.32	-0.63
AÑO	0.10	0.22	0.81
$\text{Na}^+$	0.06	0.78	-0.04
$\text{Mg}^{2+}$	-0.13	0.83	-0.03
vol. lluvia (mm)	-0.69	0.07	-0.06



## REGIÓN SUROESTE

Para la zona de estudio ubicada en la región Suroeste, se analizaron 926 datos de depósito húmedo, los cuales corresponden a un muestreo de 6 años consecutivos de estudio (2003-2009), en el cual, se determinaron los parámetros de pH, conductividad, y concentraciones iónicas ( $\mu\text{Eq/L}$ ) de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  separando los eventos por volumen de lluvia y año del evento, lo que da una matriz de (11,926).

En la tabla 1, se muestran los valores de correlación de éstos parámetros distribuidos en 3 componentes principales, los cuales explican el 61.6% de los datos

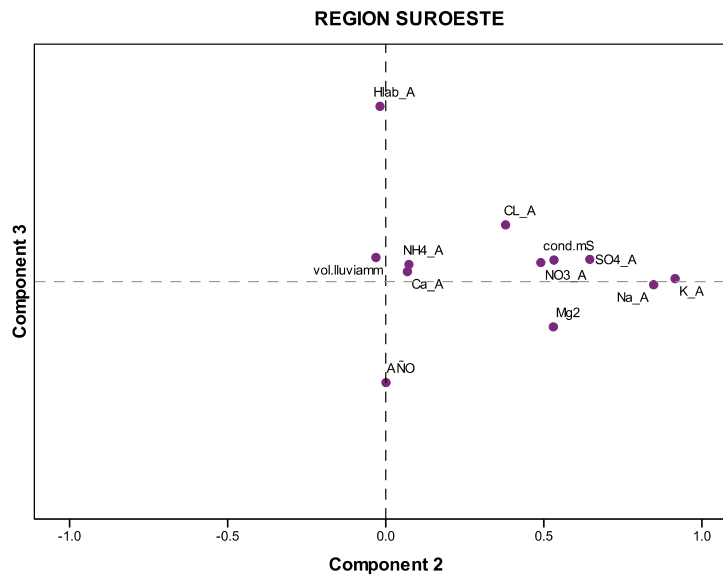
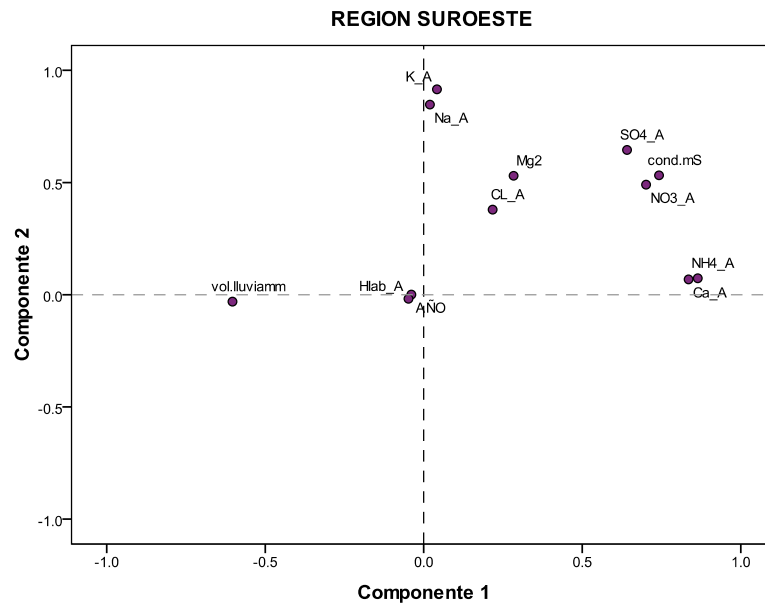
Tabla 1 Matriz de componentes para los datos de la región Suroeste

	Componente		
	1	2	3
$\text{NH}_4^+$	0.86	0.07	0.08
$\text{Ca}^+$	0.84	0.07	0.05
cond. (mS)	0.74	0.53	0.10
$[\text{NO}_3^-]$	0.70	0.49	0.09
$[\text{SO}_4^{2-}]$	0.64	0.65	0.10
$\text{Mg}^{2+}$	0.28	0.53	-0.21
$[\text{Cl}^-]$	0.22	0.38	0.27
$\text{K}^+$	0.04	0.92	0.01
$\text{Na}^+$	0.02	0.85	-0.01
AÑO	-0.04	0.00	-0.47
$[\text{H}^+]$ lab	-0.05	-0.02	0.82
vol. lluvia (mm)	-0.60	-0.03	0.11

El componente 1, nombrado “componentes mayoritarios”, explica la relación de los parámetros:  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , conductividad,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ . Los cuales se encuentran en mayor concentración como ion y contra-ion.

El componente 2, “aerosoles marinos” representa la relación de los parámetros:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Cl}^-$

El componente 3, “Acidez” proporciona una varianza acumulada del 61.6%, y esta representado por el ion  $\text{H}^+$  y su relación con el volumen de lluvia y el año de muestreo.



### REGIÓN SURESTE

Para la región Sureste, se analizaron 296 datos de depósito húmedo, se elaboró una matriz con los parámetros de pH, conductividad, y concentraciones iónicas ( $\mu\text{Eq/L}$ ) de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  separando los eventos por volumen de lluvia y año del evento, lo que da una matriz de (11,296).

En la tabla 1, se muestran los valores de correlación de éstos parámetros distribuidos en 4 componentes, los cuales explican el 69.23% de los datos, (Tabla 2).

Como se observa en la tabla 2, se describen 4 componentes principales:

El primer componente explica la relación de conductividad,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ , como iones mayoritarios.

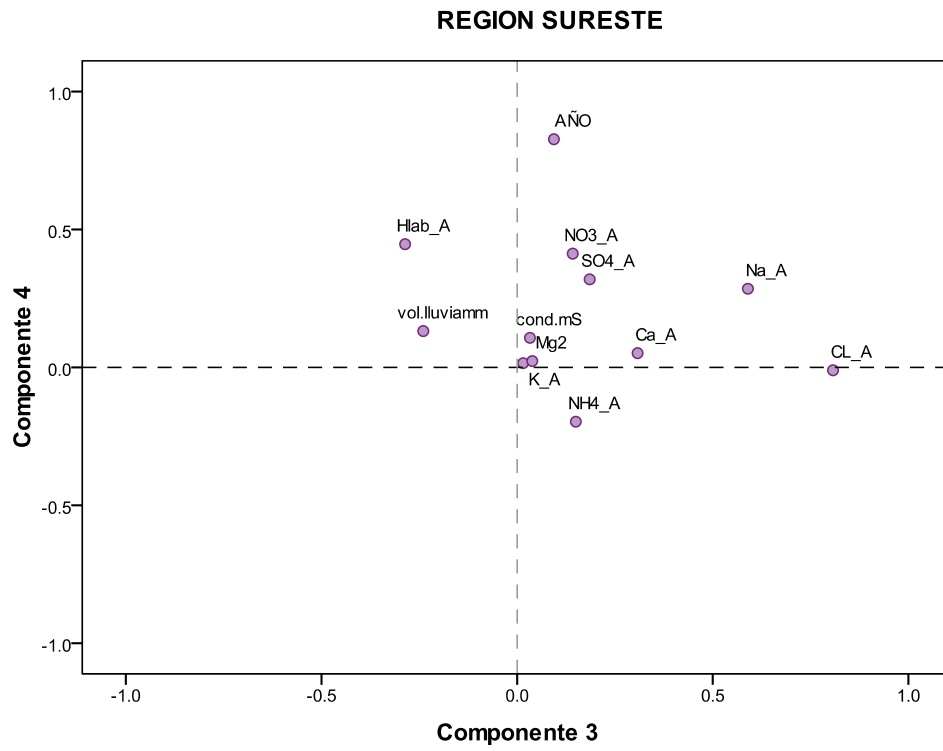
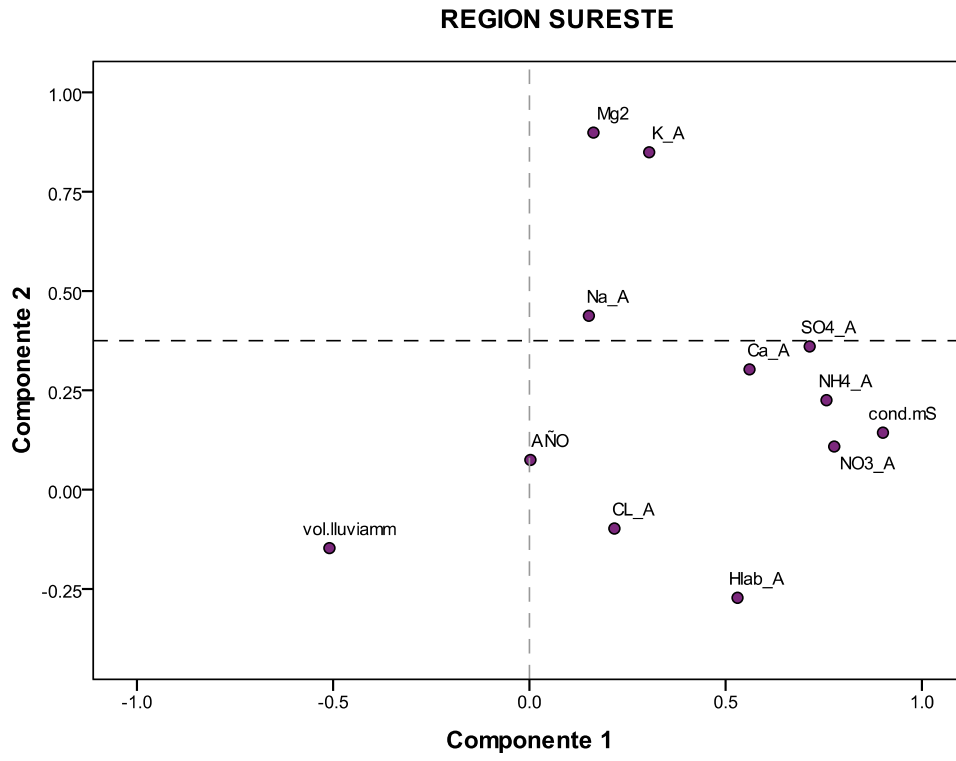
El segundo componente, relaciona el  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , y  $\text{Mg}^{2+}$ , los cuales son iones residuales de combustión a elevadas temperaturas.

El tercer componente, esta integrado por  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$ , los cuales son aerosoles marinos.

El cuarto componente relaciona la concentración de los iones  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  con el año en el cual se obtuvieron las muestras y su acidez.

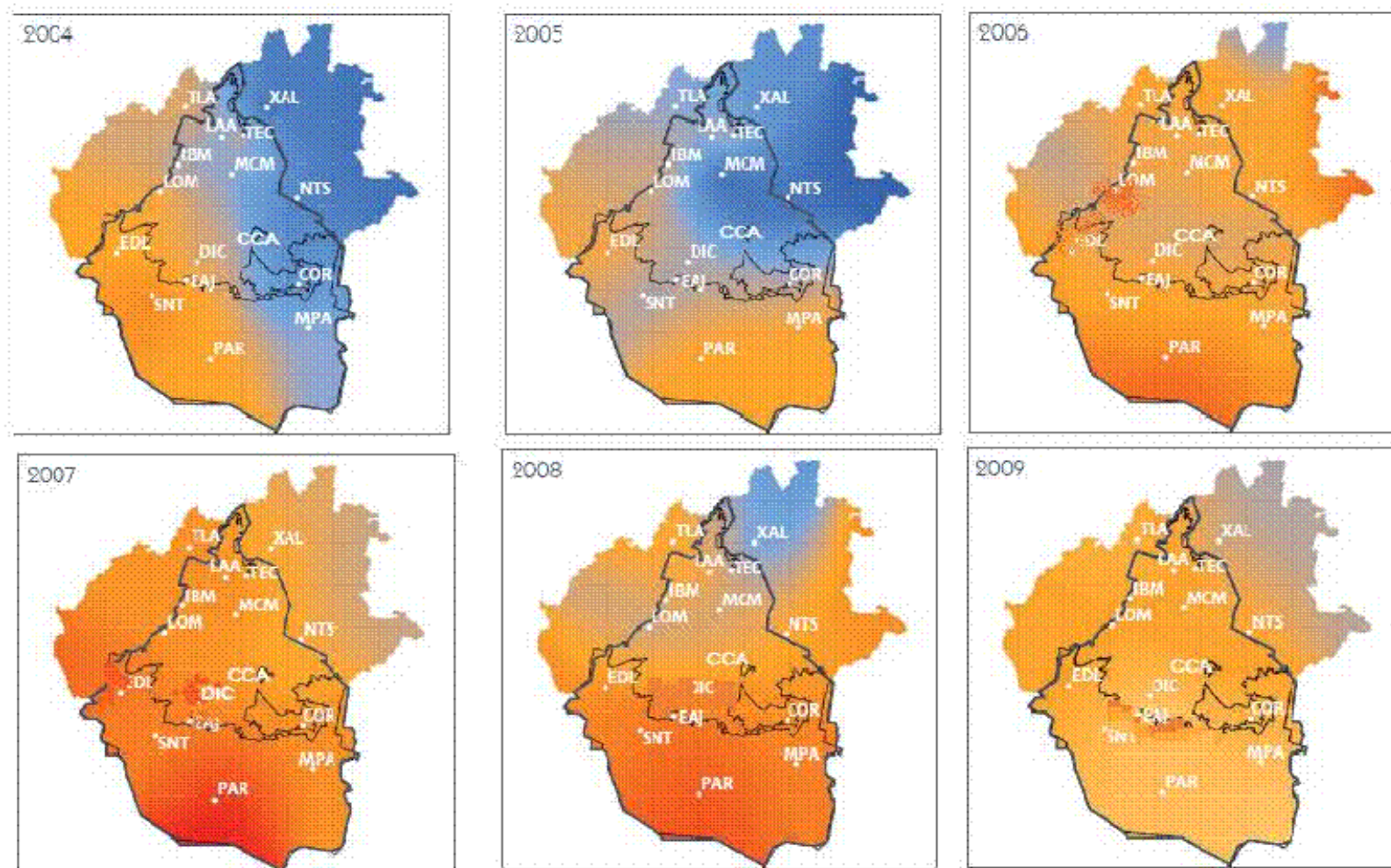
	Componente			
	1	2	3	4
cond. (mS)	.901	.143	.033	.107
[NO3-]	.777	.108	.142	.412
NH4-	.757	.225	.150	-.197
[SO4=]	.714	.361	.185	.319
Ca+	.561	.303	.308	.051
[H+] lab	.530	-.272	-.286	.446
K+	.305	.849	.015	.015
[CL-]	.217	-.098	.807	-.011
Mg2+	.163	.899	.039	.023
Na+	.151	.438	.590	.285
AÑO	.003	.075	.094	.827
vol. lluvia (mm)	-.509	-.147	-.240	.132



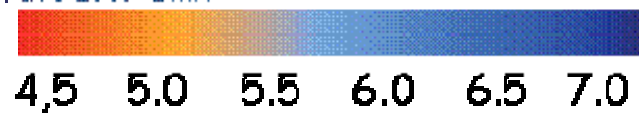


**ANEXO 5**  
**MAPAS DE DISTRIBUCIÓN**

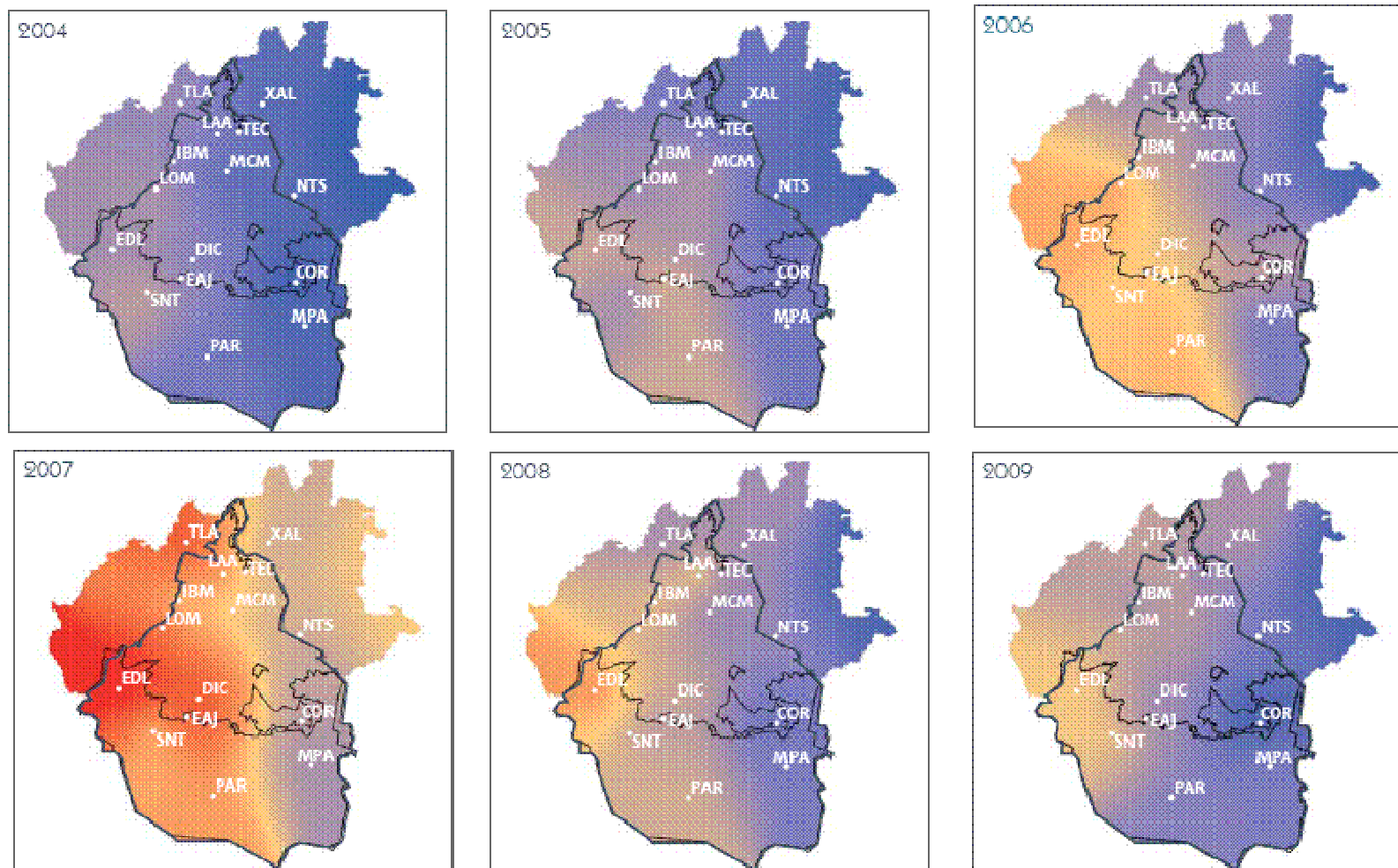
## DISTRIBUCION DE (pH)



Fuente: Informe anual de Calidad del Aire 2009 SMA



## DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE ION $SO_4^{=}$



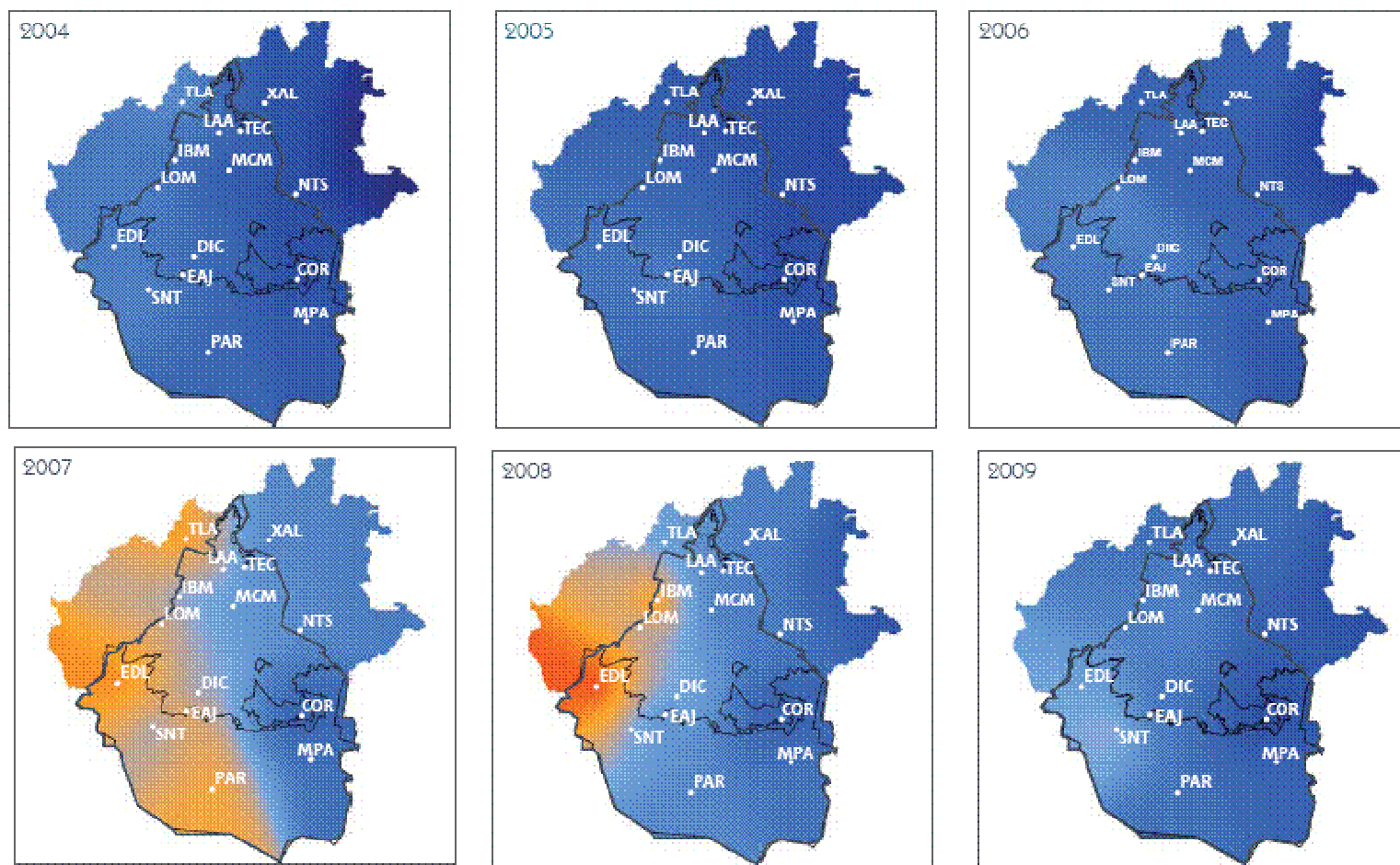
Fuente: Informe anual de Calidad del aire 2009. SMA



Depósito total (kg/ha)

5 15 25 30 35 40 45

## DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE ION NO<sub>3</sub>



Fuente: Informe anual de Calidad del aire 2009. SMA

