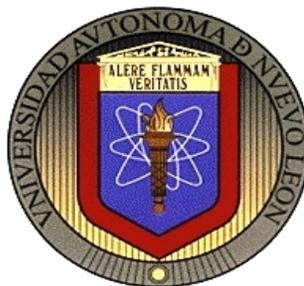


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS**



***“APLICACIÓN DE UN MODELO PARA LA EVALUACIÓN  
DE FUENTES POTENCIALES DE EMISIÓN DE  
PRECURSORES DE DEPOSITACIÓN ÁCIDA”***

Por:

**Evangelina Ramírez Lara**

Como requisito parcial para obtener el Grado de  
DOCTOR EN CIENCIAS con Orientación en Procesos Sustentables

Diciembre de 2009

**“APLICACIÓN DE UN MODELO PARA LA EVALUACIÓN DE FUENTES  
POTENCIALES DE EMISIÓN DE PRECURSORES DE DEPOSITACIÓN  
ÁCIDA”**

Aprobación de la Tesis:

---

Dra. Rosa del Carmen Miranda Guardiola  
Presidente

---

Dra. Yolanda A. Gracia Vásquez  
Secretaria

---

Dr. José Angel Loredo Medrano  
1er Vocal

---

Dr. Isaias Balderas Renteria  
2do Vocal

---

Dr. Ulrico López Chuken  
3er Vocal

---

Dra. María Teresa Garza González  
Subdirectora de Estudios de Posgrado

## DEDICATORIA

*A mi padre Sr. Ramiro Ramírez Ayala (†), hombre visionario y ejemplo de vida, por todas sus enseñanzas.*

*A mi madre Sra. Evangelina Lara de Ramírez, por ser ejemplo de templanza y fortaleza, por siempre estar conmigo, por todo su amor.*

*A mi querido esposo Juan Manuel por todo su amor y apoyo incondicional desde que formamos una familia, sin ti no hubiera podido realizar este proyecto de vida.*

*A mis adoradas hijas Samantha y Melissa, por comprender mi trabajo y por el tiempo que no he estado con ustedes, que Dios las bendiga.*

*A mis hermanos Blanca y Martín, Ramiro y Olga, Rolando y Nora por su apoyo y comprensión.*

*A mis sobrinos Angel, Denisse, Dante y Darío.*

*A todas las futuras generaciones de jóvenes quienes tendrán la encomienda de cuidar nuestro planeta.*

## AGRADECIMIENTOS

A Dios por todo lo que me ha permitido realizar, principalmente por la vida.

A mi Alma Mater la Universidad Autónoma de Nuevo León por todo el apoyo recibido y por el financiamiento de este proyecto, a través del Proyecto PAICYT No. CA1047-05.

A los Directivos de la Facultad de Ciencias Químicas de la UANL, especialmente al Dr. Sergio Fernández Delgadillo y a la QFB Gloria Nelly Páez Garza por el valioso apoyo para realizar y difundir este trabajo.

A la QFB Emilia E. Vázquez Farías, ex.-Directora de la FCQ por el valioso apoyo brindado a este proyecto durante su gestión y por su amistad.

A la Dra. Rosa del Carmen Miranda Guardiola por su apoyo, consejos y por transmitirme sus experiencias para elaborar este trabajo

A los integrantes del Comité de Tesis. Dra. Yolanda Gracia, Dr. Isaías Balderas, Dr. José Angel Loredo y Dr. Ulrico López por sus valiosas aportaciones para mejorar este trabajo.

Al Dr. Humberto Bravo Álvarez por todas sus enseñanzas, por su confianza y por ser un ejemplo a seguir para las nuevas generaciones de investigadores en esta interesante área de la Contaminación Atmosférica.

Al personal de la Sección de Contaminación Ambiental del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México, por abrirme sus puertas, en especial a la QFB Ana Luisa Alarcón, Dr. Rodolfo Sosa, Biólogo Pablo Sánchez e IQ Gilberto Fuentes, por todos sus consejos y apoyo en lo realización de este trabajo.

A mis queridas amigas Sandra, Yolanda, Ivonne y Martha por siempre estar conmigo, por lo que he aprendido de ustedes como personas y profesionistas.

A Mariano, Aldo, Grissel, Tania, Fabiola, Flor, Diana, Melissa y a los auxiliares del Departamento de Residuos de la FCQ UANL por su ayuda desinteresada.

Al Dr. Jonathan Kahl de la Universidad de Milwaukee-Wisconsin por compartirme sus conocimientos de Meteorología y por su amistad.

Al Dr. Javier Reyes de la Universidad Autónoma de Campeche por facilitarme valiosa información para la elaboración de este trabajo y por su amistad.

Al personal del apoyo de la Jefatura del Área de la Carrera de QFB, Ninfa, Yoli y Ale por las facilidades y apoyo brindado a una servidora.

A la Lic. Rosalba García por siempre estar conmigo, por ayudarme a ver la vida desde otra perspectiva.

Al personal del Departamento de Informática de la FCQ, muchas gracias por su ayuda.

A toda la gente maravillosa que conocí durante el desarrollo de este trabajo, muchas, muchas gracias.

## TABLA DE CONTENIDO

Capítulo	Página
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Mecanismos de formación de lluvia ácida.....	3
1.2 Origen de las sustancias que forman depósitos ácidos.....	5
1.3 Formación de depósitos ácidos.....	7
1.4 Descripción física y meteorológica del Área Metropolitana de Monterrey.....	10
1.4.1 Industria y medio ambiente.....	13
1.4.2 Meteorología.....	14
1.5 Estudios de Contaminación Atmosférica en México.....	17
<b>2. ANTECEDENTES.....</b>	<b>21</b>
2.1 Cronología de los estudios de lluvia ácida.....	22
2.2 Estudios de lluvia ácida en México.....	36
2.3 Estudios en el Estado de Nuevo León.....	40
2.4 Hipótesis.....	43
2.5 Objetivo general.....	43
2.6 Objetivos específicos.....	43
2.7 Justificación.....	44
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>45</b>
3.1 Muestreo.....	45
3.1.1 Obtención de muestras de depositación húmeda y seca.....	45
3.1.2 Obtención de muestras de lluvia gruesa (bulk).....	49
3.2 Caracterización fisicoquímica de los diferentes tipos de precipitación.....	50
3.2.1 Volumen total.....	50
3.2.2 Determinación de pH.....	50
3.2.3 Determinación de conductividad.....	50
3.2.4 Análisis de los depósitos.....	50
3.2.4.1 Depósito seco.....	50
3.2.4.2 Depósito húmedo y grueso (bulk).....	51
3.2.4.3 Análisis de cationes y aniones en depósitos grueso, húmedo y seco.....	51

<b>Capítulo</b>	<b>.... Página</b>
3.3 Parámetros meteorológicos.....	52
3.3.1 Medición de precipitación (mm).....	52
3.3.2 Rosa de vientos.....	53
3.4 Análisis Estadístico.....	53
<b>4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>54</b>
4.1 Volumen total.....	54
4.2 Análisis fisicoquímico.....	56
4.2.1 Determinación de pH.....	56
4.2.2 Determinación de conductividad.....	63
4.2.3 Análisis de la composición química.....	66
4.2.3.1 Depósito grueso.....	66
4.2.3.2 Depósito húmedo.....	67
4.2.3.3 Depósito seco.....	69
4.3 Origen de las fuentes de emisión.....	70
4.4 Meteorología.....	78
4.4.1 Cantidad de precipitación (mm).....	78
4.4.1.1 Depósito grueso.....	78
4.4.1.2 Depósito húmedo.....	79
4.4.2 Humedad relativa y tendencias de SO <sub>2</sub> y NO <sub>x</sub> .....	80
4.4.3 Rosa de los vientos.....	82
<b>5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>92</b>
<b>6. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>96</b>
<b>7. REFERENCIAS.....</b>	<b>98</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>107</b>
Anexo 1 Material y equipo.....	107
Anexo 2 Valores máximos, mínimos, desviación estándar y concentración promedio ponderada (ppm) para cada tipo de depósito por año de estudio .....	109

<b>Capítulo</b>	<b>Página</b>
Anexo 3 Composición iónica para cada tipo de depósito en $\mu\text{eq/l}$ , promedio ponderado mensual.....	113
Anexo 4 Rosa de vientos anuales para días sin lluvia, años Años 2006,2007 y 2008.....	117
Anexo 5 Rosa de vientos concentradas para los 3 años, 2006-2008 días sin lluvia.....	119
Anexo 6 Rosas de vientos diarias para días lluviosos, años 2006-2008.....	120

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla</b>	<b>Página</b>
1.1 Comparación entre la composición de depositación gruesa y húmeda	9
1.2 Geología del Área Metropolitana de Monterrey	11
1.3 Tipos de suelo del Área Metropolitana de Monterrey Según clasificación FAO-UNESCO	12
2.1 Cronología de los estudios de lluvia ácida	23
2.2 Estudios de lluvia ácida en México	40
4.1 Coeficiente de correlación de Pearson para especies iónicas en muestras de depósito total, año 2006	71
4.2 Coeficientes de Correlación de Pearson para especies iónicas en muestras de depósito grueso, año 2007	73
4.3 Coeficientes de Correlación de Pearson para especies iónicas en muestras de depósito húmedo, año 2007	74
4.4 Coeficientes de Correlación de Pearson para especies iónicas en muestras de depósito seco, año 2007	76
4.5 Coeficientes de Correlación de Pearson para especies iónicas en muestras de depósito húmedo, año 2008	77
4.6 Coeficiente de Correlación de Pearson para especies iónicas en muestras de depósito seco, año 2008	78

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
1.1 Geología del Área Metropolitana de Monterrey	13
3.1 Colector automático de depositación húmeda y seca	47
3.2 Procedimiento general para la recolección de muestras de depositación húmeda	48
3.3 Equipo para muestreo de depósito total (bulk)	49
3.4 Pluviómetro calibrado	52
4.1 Volúmenes totales de lluvia (ml) gruesa y húmeda obtenidos durante el período 2006-2008	55
4.2 pH ponderado promedio para depósito grueso, depósito húmedo y depósito seco	58
4.3 Distribución de frecuencia en % para pH para depósito grueso, depósito húmedo y depósito seco	61
4.4 Valores de Conductividad promedio ponderada para depósito grueso, depósito húmedo y depósito seco	64
4.5 Concentración iónica promedio ponderada anual para depósito grueso, años 2006 y 2007	66
4.6 Concentración iónica promedio ponderada anual para depósito húmedo, años 2006, 2007 y 2008	68
4.7 Concentración iónica promedio ponderada anual para depósito seco años 2006,2007 y 2008	69
4.8 Cantidad de lluvia gruesa (mm) acumulada por mes	79
4.9 Cantidad de lluvia húmeda (mm) acumulada por mes	79

## LISTA DE FIGURAS (continuación)

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
4.10 % Humedad relativa y concentración de SO <sub>2</sub> en el AMM	80
4.11 % Humedad relativa y concentración de NO <sub>x</sub> en el AMM	81
4.12 Rosas de vientos para diferentes meses y estaciones del año 2006	83
4.13 Rosas de vientos para diferentes meses y estaciones del año 2007	86
4.14 Rosas de vientos para diferentes meses y estaciones del año 2008	89
4.15 Rosas de vientos concentradas para los años 2006 2007 y 2008	90

## NOMENCLATURA

AMM	Área Metropolitana de Monterrey
ASTM	American Standard and Testing and Materials
Atm	atmósferas
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
Cm	centímetros
CPP	Concentración ponderada promedio
DS	Desviación estándar
FAO	Organización para la Alimentación y la Agricultura
HCl	Ácido clorhídrico
HNO <sub>3</sub>	Ácido nítrico
HPLC	High Performance Liquid Chromatography
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Ácido sulfúrico
HVS	High volumen sampler (muestreador de alto volumen)
L	Litro
mm	milímetros
m/s	metros por segundo
NE	Noreste
NO	Noroeste
NADPUSA	Nacional Acidic Deposition Program, United State of America

NH <sub>3</sub>	Amoníaco
NO <sub>x</sub>	Óxidos de Nitrógeno
O <sub>2</sub>	Oxígeno
PACADAM	Programa de Gestión de Calidad del Aire del Área Metropolitana de Monterrey .
pH	Logaritmo negativo de la concentración de iones hidrógeno
pka	Logaritmo negativo de la constante de acidez
PST	Partículas suspendidas totales
PM <sub>10</sub>	Partículas menores a diez micras
ppm	Partes por millón
ppb	Partes por billón
PROAIRE	Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire del Área Metropolitana de Monterrey
SE	Sureste
SO	Suroeste
SO <sub>2</sub>	Dióxido de azufre
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
μS/cm	microsimens/centímetro
μeq /l	micro equivalentes por litro

## RESUMEN

Evangelina Ramírez Lara

Fecha de Graduación: Diciembre 2009

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ciencias Químicas

Título del Estudio: APLICACIÓN DE UN MODELO PARA LA EVALUACIÓN DE FUENTES POTENCIALES DE PRECURSORES DE DEPOSITACIÓN ÁCIDA

Número de páginas: 125

Candidato para obtener el grado de Doctor en Ciencias con Orientación en Procesos Sustentables.

Área de Estudio: Evaluación de la Calidad del Aire

Los problemas ambientales causados por la acidez de la atmósfera son bien conocidos. Recientemente se han realizado innumerables esfuerzos para entender los procesos fisicoquímicos responsables de la formación de especies ácidas y su remoción de la atmósfera. En el presente trabajo se investigó la composición química del depósito atmosférico total, húmedo y seco en el Área Metropolitana de Monterrey. El período de muestreo comprendió del mes de Junio de 2006 a Diciembre de 2008. El equipo utilizado fue un colector automático el cual se ubicó en la azotea del edificio redondo de la Facultad de Ciencias Químicas de la UANL. Se recolectaron y analizaron 22 muestras de depósito grueso, 58 de depósito húmedo y 20 de depósito seco, determinando la concentración de los iones  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$  por Cromatografía de Líquidos de Alta Resolución, además de pH y conductividad. Los resultados mostraron que los valores de pH fueron mayores a 5.6 debido probablemente a la neutralización que ejercen partículas alcalinas sobre las especies ácidas presentes en el aire. La química del agua de lluvia mostró una alta concentración de los iones  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$  como especies catiónicas y de  $\text{SO}_4^{-2}$  y  $\text{Cl}^-$  como especies aniónicas. La baja concentración de  $\text{H}^+$  encontrada en las muestras de agua de lluvia sugiere que una parte importante de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y de  $\text{HNO}_3$  fue neutralizada por partículas alcalinas presentes en la atmósfera.

Se encontró alta correlación entre los iones  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$  lo que probablemente indica que proceden de la misma fuente.

Los parámetros meteorológicos evaluados, humedad relativa y cantidad de precipitación incidieron directamente en la disminución de la concentración iónica de ciertos iones estudiados así como la velocidad del viento influyó en los fenómenos de dispersión de las contaminantes presentes en el aire de acuerdo a las rosas de vientos obtenidas.

Con relación a las fuentes de emisión se concluye que son de origen natural y antropogénico, como por ejemplo la industria de extracción de minerales no metálicos ubicadas al poniente de la localidad y la composición propia de las montañas pueden estar contribuyendo a las altas concentraciones de  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$ , debido a lo cual la calidad del aire presenta serios problemas debido principalmente a la presencia de partículas suspendidas.

Los resultados de esta investigación serán utilizados para evaluar la composición de la depositación atmosférica, la calidad del aire y así como para desarrollar estrategias e implementar medidas de control de las emisiones atmosféricas en el Estado. El presente trabajo representa la primera contribución de la química del agua de lluvia en el Noreste de México.

FIRMA DEL ASESOR: \_\_\_\_\_

