

COMPORTAMIENTO DE LA ACIDEZ DE LA LLUVIA EN UN VALLE SEMICERRADO DE MÉXICO: ZONA METROPOLITANA DE GUADALAJARA (ZMG)

García-Guadalupe M.E., Ramírez-Sánchez H.U., Espinosa-Martínez M.L., Meulenert-Peña A.R., García-Concepción F.O., Alcalá-Gutiérrez J. Laboratorio de Química de la Atmósfera - Instituto de Astronomía y Meteorología - Departamento de Física - División de Ciencias Básicas - Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías - Universidad de Guadalajara. Av. Vallarta 2602. Col. Arcos Vallarta, Guadalajara Jal. Méx. Tels: 3616-4937, Fax 3615-9829; E-mail: megarcia@astro.iam.udg.mx

SUMMARY

Guadalajara is the second more important city of Mexico. As a result of an intense urban and industrial development as of the years 70's, has presented serious problems of environmental contamination and as consequence "the acid rain" presence. The main substances that give rise to the change in the nature of rain are the oxides of nitrogen (NO_x) and sulfur (SO_x) that are transformed into nitric acids (HNO₃) and sulfuric (H₂SO₄) adding a high degree of acidity. The studies made on acid rain identify to sulphates (SO₄²⁻), nitrates (NO₃⁻) and chlorides (Cl⁻) between the related most important substances with the acidity. In this work the rains in the period from 1994 to 2002 were analyzed and as they influence the dynamic conditions (winds) in the transport and deposit of the acid substances in the ZMG. Three parameters were analyzed: pH (potenciometric method), SO₄²⁻ (turbidimetric method), Cl⁻ (argentometric method) in the period 1994-2002 and NO₃⁻ (method of Cadmium reduction) analyzed 1999, 2001 and 2002. The samplings took place between the months of June to September. The obtained results were treated by means of graphic interpolation, providing distributions of each one of the parameters in the ZMG. The main contributed conclusions are:

1. The atmospheric contamination in the ZMG has modified the chemical nature of rain. The acid rain frequency has diminished, whereas its acid concentration was greater.
2. The distribution average weighed of pH in all the period (1994-2002) defined to the region the West like most acid.
3. Weathers 2000, 2001 and 2002 were the ones that presented the SO₄²⁻ concentrations more losses, whereas 1999 presented highest.
4. Weather 1999 presents correspondence between the 4 parameters (pH, SO₄²⁻, Cl⁻ and NO₃⁻), coverall in the regions East and West of the ZMG.
5. A great variability in the concentrations was observed of Cl⁻ the period of analysis throughout, reason why a defined affluent pattern did not settle down itself.
6. The wind dynamics influences in the behavior and dispersion of polluting agents and in acid rain, which is clearly observable in the parameter of pH, whereas in the other parameters not this defined its influence clearly.

KEY WORDS: Acid rain, SO₄²⁻, Cl⁻, NO₃⁻, pH.

RESUMEN

Guadalajara es la segunda ciudad más importante de México. A raíz de un intenso desarrollo urbano e industrial a partir de los años 70's, ha presentado graves problemas de contaminación ambiental y como consecuencia la presencia de "lluvias ácidas". Las principales sustancias que dan lugar al cambio en la naturaleza de la lluvia son los óxidos de nitrógeno (NO_x) y de azufre (SO_x) que se transforman en ácidos nítrico (HNO₃) y sulfúrico (H₂SO₄) agregando un alto grado de acidez. Los estudios realizados sobre lluvia ácida identifican a los sulfatos (SO₄²⁻), nitratos (NO₃⁻) y cloruros (Cl⁻) entre las sustancias más importantes ligadas con la acidez. En este trabajo se estudiaron los temporales de lluvias en el periodo de 1994 a 2002 y como influyen las condiciones dinámicas (vientos) en el transporte y depósito de sustancias ácidas en la ZMG. Se analizaron tres parámetros: pH (método potenciométrico), SO₄²⁻ (método turbidimétrico), Cl⁻ (método argentométrico) en el periodo 1994-2002 y NO₃⁻ (método de reducción de Cadmio) se analizó 1999, 2001 y 2002. Los muestreos se efectuaron entre los meses de Junio a Septiembre. Los resultados obtenidos fueron tratados mediante Interpolación grafica, proporcionando distribuciones de cada uno de los parámetros en la ZMG. Las principales conclusiones aportadas son:

1. La contaminación atmosférica en la ZMG ha modificado la naturaleza química de la lluvia. La frecuencia de lluvias ácidas han disminuido, mientras que su concentración ácida fue mayor.
2. La distribución promedio ponderada del pH en todo el periodo (1994-2002) definió a la región Oeste como la más ácida.
3. Los temporales 2000, 2001 y 2002 fueron los que presentaron las concentraciones de SO₄²⁻ más bajas, mientras que 1999 presentó las más altas.
4. El temporal 1999 presenta correspondencia entre los 4 parámetros (pH, SO₄²⁻, Cl⁻ y NO₃⁻), sobretodo en las regiones Este y Oeste de la ZMG.
5. Se observó una gran variabilidad en las concentraciones de Cl⁻ durante todo el periodo de análisis, por lo que no se estableció un patrón bien definido.
6. La dinámica de vientos influye en el comportamiento y dispersión de contaminantes y en la lluvia ácida, lo cual es claramente observable en el parámetro de pH, mientras que en los otros parámetros no esta claramente definida su influencia.

PALABRAS CLAVES: Lluvia ácida, SO₄²⁻, Cl⁻, NO₃⁻, pH.

INTRODUCCIÓN

Guadalajara capital de Jalisco, localizada geográficamente entre 20° 30" y 20° 50" de latitud Norte y 103° 15" y 103° 30" de longitud Oeste, a una altura promedio de 1540 m. snmm. (Fig. 1), es la segunda ciudad más importante de México tanto en población urbana como en importancia socioeconómica. A raíz de un intenso desarrollo urbano e industrial sin planeación ni control a partir de los años 70's, ha presentado graves problemas de contaminación ambiental y como consecuencia la presencia de "lluvias ácidas".

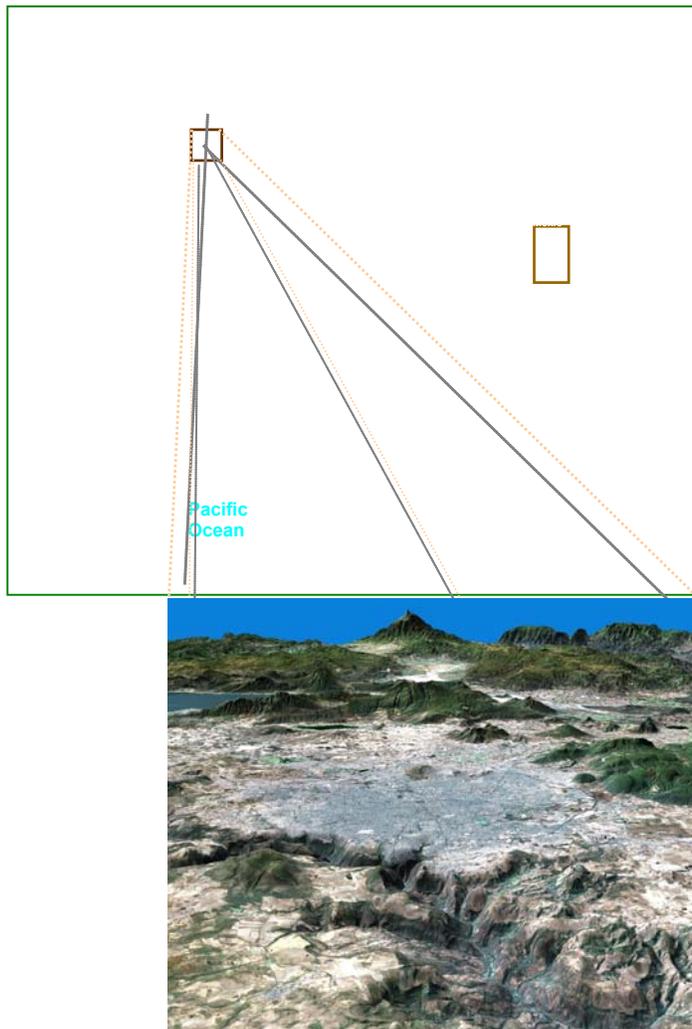


Figura 1. Mapas de Ubicación: México-Jalisco-ZMG

Las principales sustancias que dan lugar al cambio en la naturaleza de la lluvia son los óxidos de nitrógeno (NO_x) y de azufre (SO_x) que se transforman en ácidos nítrico (HNO_3) y sulfúrico (H_2SO_4) agregando un alto grado de acidez. Los estudios realizados sobre lluvia ácida identifican a los sulfatos (SO_4^-), nitratos (NO_3^-) y cloruros (Cl^-) entre las sustancias más importantes ligadas con la acidez [1].

Es importante el estudio de la lluvia ácida ya que constituye un indicador de la calidad del aire. Mediante la medición de algunos parámetros podemos saber en que niveles está contaminada la atmósfera y que tan eficaces han sido las medidas para combatir la emisión de contaminantes precursores de lluvia ácida [2]. Además, es posible conocer la relación entre las zonas que presentan este fenómeno con daños observados a flora, fauna y materiales alertando sobre la importancia de la implementación de medidas de prevención y control.

ANTECEDENTES

La lluvia ácida es un problema a escala mundial que se presenta tanto en países desarrollados como en aquellos en vías de desarrollo. Se detectó desde 1872 según investigaciones de Angus Smith, en Manchester (Inglaterra) sobre depósito y lavado atmosférico [3]. La primera mención sobre "lluvia ácida" en el siglo XX ocurrió en una Conferencia de la ONU sobre el Medio Humano. Los estudios iniciaron en los años 50's y a partir de los 60's numerosos trabajos revelaron la presencia de lluvia ácida en Europa y Norteamérica. Posteriormente en 1972 en una conferencia de la ONU en Estocolmo Suecia, se presentan resultados del deterioro que causa [4]. Estados Unidos de Norteamérica, Canadá, Suecia, Alemania, Japón entre otros, han desarrollado programas para atender los procesos que conllevan a la formación de lluvia ácida y los efectos que está generando en los ecosistemas terrestres, acuáticos, áreas de cultivo y materiales [5]. Los primeros estudios en México son relativamente recientes (1980); entre ellos se encuentran los realizados en la Ciudad de México, Toluca y Veracruz (Tabla I).

El Programa de Precipitación Ácida de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (PPAZMCM) lleva a cabo investigaciones sobre depósito atmosférico (total, húmedo y seco). En 1997 registran pH entre 3.38 y 3.95 unidades; En 1998 el pH osciló entre 4.10 y 4.38 y, en 1999 los máximos variaron entre 3.94 y 5.71 [6].

En la Ciudad de Guadalajara, Severo Díaz Galindo en 1934, realizó los primeros trabajos sobre lluvia ácida, recolectando muestras en el pluviómetro del observatorio meteorológico (Instituto de Astronomía y Meteorología de la Universidad de Guadalajara). En sus trabajos destaca la lluvia del 27 de Mayo de 1934, de la que obtuvo resultados importantes como la presencia de amoníaco, sales amoniacaes, azufre libre, entre otras [7]. Posteriormente, Briseño Muñiz analiza el pH de la lluvia durante el periodo 1976-1993 en el mismo sitio de monitoreo, encontrando valores con carácter ácido con pH entre 5.1 y 3.6 unidades [8].

Tabla I. Principales investigaciones en México sobre lluvia ácida

Investigadores	Estudios
Bravo et. al. (1980-1983) México, D. F (1984) Cd. de México y áreas rurales	pH entre 4.81 y 6.5; $SO_4^{=}$ entre 4.43 y 18.82 mg/L NO_3^- entre 1.17 y 6.09 mg/L
Báez y Padilla (1983) México, D. F (1984) México, D. F y áreas rurales	pH = 5.5 , pH = 5.4 $SO_4^{=}$ = 7.9 y 18.8 mg/L; NO_3^- = 1.5 y 6.2 mg/L
Ortiz (1985) centro histórico- México, D. F	HNO_3 y H_2SO_4
Páramo et. al. (1985) México, D. F	pH entre 4.29 y 5.15
Peñaranda (1987) México, D. F	pH = 5.45; $SO_4^{=}$ = 5.32 y 19.3 mg/L; NO_3^- = 1.31 y 6.34 mg/L; Cl^- = 5.05 mg/L
Leyva (1988) México, D. F	pH = 5.37
García et. al. (1987-1991) México, D. F	pH = 5.48
García et. al. (1994) México, D. F	pH = 5.57; $SO_4^{=}$ =19.42 mg/L Cl^- = 5.67 mg/L
Calderón (1987-1988) Toluca Edo de México	pH = 5.56; $SO_4^{=}$ = 12.27 mg/L; NO_3^- = 2.8 mg/L
Kanuga (1984) Veracruz (Jalapa)	pH = 6.22; $SO_4^{=}$ =11.40 mg/L; Cl^- = 5.13mg/L

ZONA METROPOLITANA DE GUADALAJARA

La ZMG presenta un área de 2239 km², con una población aproximada de 4 millones de habitantes. Se sitúa principalmente sobre el denominado Valle de Atemajac [9]. Alrededor de la ZMG se localizan pocas áreas boscosas (“El Bosque de la Primavera” en dirección Sursuroeste y “El Bosque Los Colomos” hacia el Nor-noroeste). Esta región tiene un clima templado, subhúmedo con lluvias en verano según la clasificación de Köppen [10]. Los días promedio anual con lluvia oscilan entre 78 y 85. La precipitación acumulada varía entre 700 a 900 mm. por temporal (de Mayo a Octubre), el resto del año es considerado temporada seca (precipitación menor a 70 mm.).

Dinámica de Vientos: El período húmedo inicia a partir de la segunda mitad del mes de mayo, presentando importantes lapsos de calmas hasta que en la segunda mitad de Junio se acentúan gradualmente flujos de

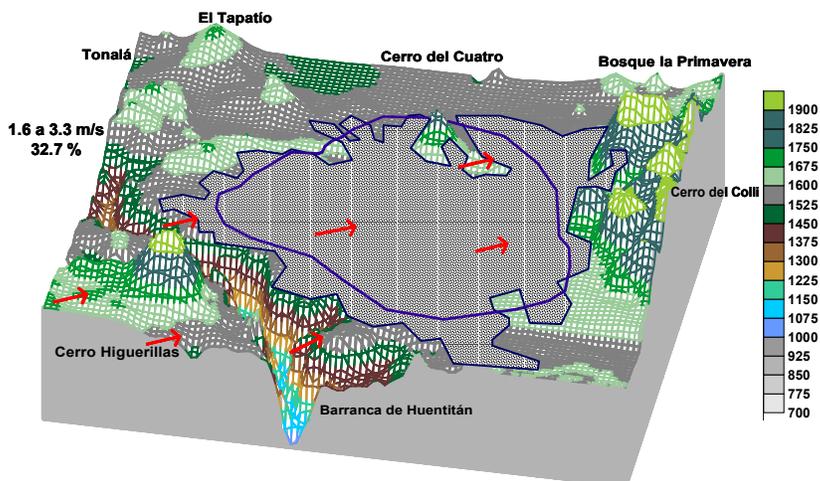


Figura 1a. Relieve de la Zona Metropolitana de Guadalajara

vientos procedentes del Este (*Vientos Alisios*). La influencia de grandes áreas de vientos húmedos del Golfo y del Caribe da comienzo al temporal de lluvias en esta zona. Las características de la Zona Intertropical de Convergencia (ZIC) y el avance de *ondas tropicales*, así como el desarrollo de ciclones, también aportan variabilidad en los vientos. De acuerdo a esto, el transporte de contaminantes y precipitación ácida puede ocurrir hacia el Oeste y Sur-suroeste de la ZMG.

FUENTES DE EMISION Y PRECURSORES DE LLUVIA ACIDA: INDUSTRIA Y TRANSPORTE

Durante la década de los años 70's se desarrolló una amplia zona industrial en la región con un crecimiento acelerado de tal manera que a principios de 1980, la ZMG ya contaba con 13 zonas de actividad industrial predominante, englobando un total de 6,000 giros industriales; de estos, 220 considerados de alta contaminación, 1200 de nivel medio y el resto de bajo nivel [11]. Debido a la necesidad de conocer indicadores de contaminantes emitidos a la atmósfera, surge un organismo gubernamental en 1992 (COESE, actualmente Secretaría del medio ambiente para el desarrollo sustentable, SEMADES), que a partir de esta fecha lleva a cabo el registro de 6 contaminantes en 8 estaciones automáticas distribuidas en la ZMG. Así mismo, el Gobierno de Jalisco a elaborado el "Programa para el mejoramiento de la calidad del aire en la ZMG, 1997-2001" [12]. En este programa calcula un inventario de emisiones tipificando fuente y porcentaje del contaminante (Tabla II).

Tabla II. Inventario de emisiones /ZMG-Toneladas por año y porcentaje del contaminante

FUENTE	PST		SO ₂		CO		NO _x		HC		Pb		TOTAL	
	Ton/año	%	Ton/año	%	Ton/año	%	Ton/año	%	Ton/año	%	Ton/año	%	Ton/año	%
Industria	1,595	0.5	5,506	68.1	1,332	0.2	3,148	8.5	4,269	3.0	0.0	0	15,840	1.1
Servicios	40	0.1	118	1.5	729	0.1	218	0.5	57,248	39.8	0.0	0	58,353	4.2
Transporte	5,845	1.9	2,461	30.4	895,991	99.7	33,820	91	82,318	57.2	115	100	1,020,550	73.5
Vegetación y suelo	294,304	97.5	0	0.0	0	0.0	0	0	0.0	0	0.0	0	294,304	21.2
Total	301,784	100	8,085	100	898,042	100	37,186	100	143,835	100	115	100	1,393,174	100

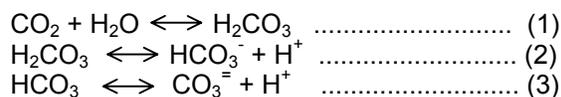
Según esta clasificación, la industria, el transporte y servicios aportan un total de 1'094,743 Ton/año, es decir, ~3,000 Ton/día; lo que equivale al 78.8% de la contaminación por fuentes antrópicas

EL POTENCIAL HIDROGENO (pH)

El factor "pH" o potencial Hidrógeno determina el *grado de acidez o alcalinidad de una sustancia*. La unidad de medición pH, se halla vinculado al contenido de iones hidrógeno (H⁺). Un pH de 3 significa que una solución contiene 1 mg de iones H⁺ por litro, en tanto que un pH de 4 corresponde a un contenido de 0.1 mg por litro. Cada vez que el contenido de iones aumenta 10 veces, el pH desciende 1 unidad. Es decir, la escala es logarítmica, significando que un pH de 4 es diez veces más ácido que un pH de 5 y 100 veces más ácido que un pH de 6 [1]. El pH es una escala que va desde 0 (lo más ácido) hasta 14 (lo más alcalino) y un pH=7 corresponde a la neutralidad; las soluciones con un pH<7 son ácidas y con pH>7 alcalinas.

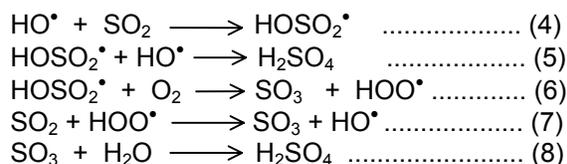
LLUVIA ÁCIDA

Las lluvias se caracterizan por ser ácidas por naturaleza; sin embargo, se da el nombre de lluvia ácida a la precipitación con pH elevado, es decir, con alta concentración de iones hidrógeno (H⁺), que contienen en disolución sustancias generadoras de pH<5.6. Las gotas de agua formadas por condensación en la atmósfera poseen habitualmente un pH cercano a 7. Sin embargo, la disolución del CO₂ atmosférico tiende reducir el pH debido a la generación de H⁺ a partir de la ionización del ácido carbónico, H₂CO₃. Este ácido es muy débil y en equilibrio con el CO₂, el pH se reduce a un valor cercano a 5.6 [13]:

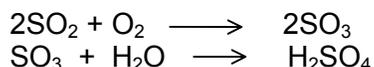


El H_2SO_4 y HNO_3 son causa de una acidificación artificial, debido más a factores antropogénicos que naturales y el pH modificado presenta valores de 5.8 a 2.0. La mayoría de SO_2 y NO_x presentes en el aire sufren un proceso de oxidación formando H_2SO_4 y HNO_3 . Estos ácidos se disuelven en las gotas de agua que forman las nubes y retornan al suelo con las precipitaciones. Una parte queda neutralizada por sustancias tales como el amoníaco, formando iones de amonio (NH_4^+). Los ácidos disueltos constan principalmente de iones H^+ , SO_4^- y NO_3^- .

Acidificación por H_2SO_4 : Uno de los mecanismos mediante el cual el SO_2 es oxidado en la atmósfera para convertirse en H_2SO_4 es con la intervención de radicales producidos por mecanismos fotoquímicos [1]. En condiciones de baja humedad, las reacciones más importantes son con el radical HO^\bullet :

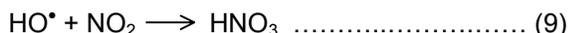


Estas reacciones poseen una rapidez de oxidación de SO_2 en la atmósfera de $\sim 5\%/h$. En condiciones de humedad la reacción principal es:

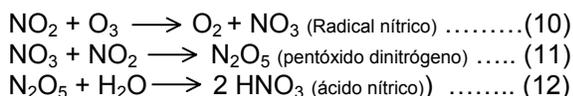


Los valores medios de los compuestos de azufre en la atmósfera son: SO_2 : 0.002 a 0.01 mg/L y SO_4^{2-} : 2 mg /m³.

Acidificación por HNO_3 : El proceso de oxidación del NO_2 a HNO_3 es más rápida ($\sim 10\%/h$). Los mecanismos más importantes son:

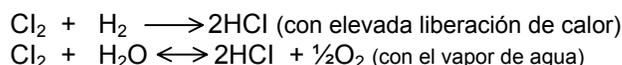


la formación inicial del reactivo NO_3 , por la reacción [1]:



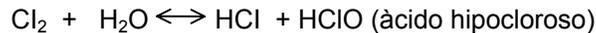
El valor ambiental medio de NO_2 es 0.001 mg/L.

Acidificación por cloro (Cl_2): La presencia del HCl en la atmósfera proviene del Cl_2 , el cual, es un elemento abundante naturaleza. Los mecanismos de reacción son:



Los gases de cloro son más dañinos a escala local. El Cl_2 es usado en la producción de químicos (p. ej: fabricación e incineración de plásticos clorinados, tratamiento de aguas,

como blanqueador,...). El Cl_2 se disuelve en el agua atmosférica y reacciona a temperatura ambiente formando:



En presencia de radiación solar, el HClO se descompone formándose HCl y O. El HCl es muy soluble en agua, por lo que se deposita como un componente de la lluvia [14].

MATERIALES Y MÉTODOS

Los objetivos de este trabajo fueron principalmente, determinar la físico-química de los temporales de lluvias en el periodo de 1994 a 2002; Evaluar los resultados analíticos y estadísticos generados sobre la calidad del agua de lluvia en la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG) y determinar la influencia de las condiciones dinámicas (vientos) en el transporte y depósito de las sustancias ácidas. Para ello, se implementó una “Red Pluviométrica” distribuida en la ZMG, cubriendo 17 zonas de muestreo (Tabla III, Fig. 2). El monitoreo correspondió a los temporales en el periodo 1994-2002.

Tabla III. Ubicación geográfica

Nº	Nombre	Claves	Datos geográficos	
			Longitud	Latitud
I	Hermosa Provincia	HPR	-103.2889	20.6803
II	Tlaquepaque	TLA	-103.2929	20.6338
III	San Juan Bosco	SJB	-103.3142	20.6726
IV	CUCEI-UdG	CEI	-103.3226	20.6594
V	Estadio Jalisco	EJL	-103.3297	20.7039
VI	Parque Morelos	PMO	-103.3390	20.6800
VII	Miravalle	MIR	-103.3447	20.6145
VIII	Transito	TRA	-103.3470	20.7094
IX	Zona Industrial	ZIN	-103.3580	20.6348
X	Zona Centro	CEN	-103.3646	20.6773
XI	Atemajac	ATE	-103.3651	20.7150
XII	Cruz del Sur	CRS	-103.3799	20.6531
XIII	Minerva	MIN	-103.3833	20.6746
XIV	Periférico Sur	PSR	-103.3989	20.6130
XV	Plaza México	PMX	-103.4018	20.6812
XVI	ZAPOPAN	ZAP	-103.4053	20.7415
XVII	El Colli	CLL	-103.4281	20.6459

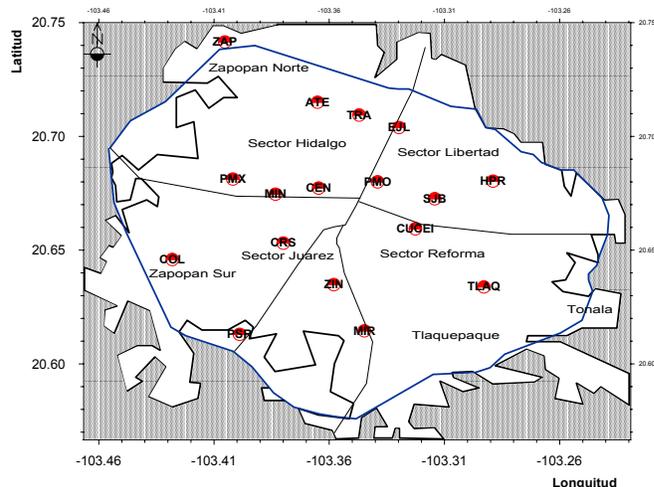


Figura 2. Distribución de estaciones de monitoreo en la ZMG (Mapa INEGI 1997)

Los pluviómetros fueron diseñados de acuerdo a las especificaciones estándar internacionales (Fig. 3).

- Las muestras se recolectaron en frascos de vidrio y plástico para su posterior análisis dentro de un periodo de 24 horas ò 48 en refrigeración (4 °C) [15].
- Las técnicas empleadas se tomaron del libro “Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater” [16] y Sistemas para análisis “Hach” [17].

Se analizaron tres parámetros: pH (método potenciométrico), SO_4^{2-} (método turbidimétrico), Cl^- (método argentométrico) en el periodo 1994-2002 y NO_3^- (método de reducción de Cadmio) se analizó 1999, 2001 y 2002 (Tabla IV). Los muestreos se efectuaron entre los meses de Junio a Septiembre. El análisis fue realizado en el Laboratorio de Química de la Atmósfera del Instituto de Astronomía y

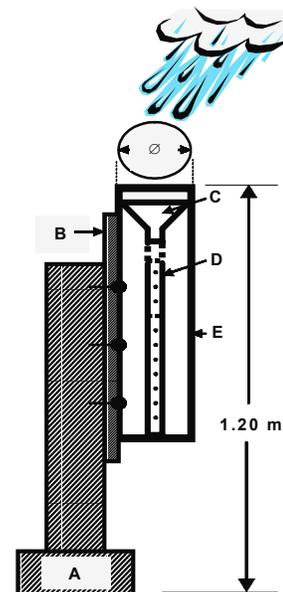


Figura 3. Sistema de recolección: A: Base; B: Placa y soporte; C: Embudo; D: Tubo colector (mm); E: Cilindro de reposo; Ø: Diámetro

Meteorología de la Universidad de Guadalajara. Los resultados obtenidos de las determinaciones analíticas fueron tratados mediante Interpolación grafica, proporcionando distribuciones de cada uno de los parámetros en la ZMG.

RESULTADOS

pH: El Temporal 1994 presentó una distribución del pH entre 5.73 y 6.38 unidades. Los niveles con tendencia ácida se localizaron en el Este y Centro de la ZMG. En 1995 se siguió manteniendo un comportamiento parecido al año anterior y se concentró hacia el Este. En 1996 (5.68-6.28) se mostró una tendencia ácida hacia el Centro y Oeste. En 1997 presentó niveles similares a los años anteriores pero en dirección Oeste. En 1998 se observó acidez normal (5.96-6.38) y homogéneamente distribuida con ligeras variaciones. El temporal del 1999 mostró un comportamiento de niveles ácidos en prácticamente toda la ZMG (4.88-5.93). El 2000 apareció como un temporal con niveles normales de acidez (5.63-6.58) con una variación de Sureste a Noroeste, presentando focos de ligera tendencia ácida en las zonas Sureste y Noroeste. En 2001 mantuvo un comportamiento semejante al año anterior. El 2002 presentó variaciones ácidas de 4.98 a 6.13 unidades. Los niveles más ácidos se concentraron hacia el Oeste de la ZMG. Finalmente, la distribución promedio ponderada de todo el periodo (1994-2002), reflejó la tendencia dominante hacia el Oeste de la ZMG (Fig. 4).

Tabla IV. Muestras analizadas (1994-2002)	
Parámetro	Determinaciones analíticas
pH (potencial Hidrógeno)	3089
SO ₄ ⁻ (Sulfatos)	3025
Cl ⁻ (Cloruros)	2951
NO ₃ ⁻ (Nitratos)	1194
Total	10 259

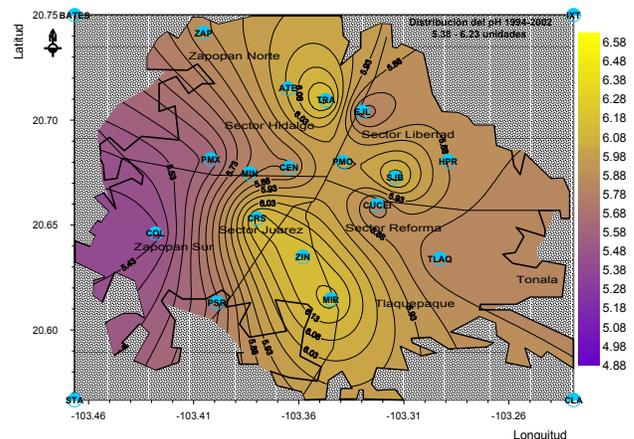


Figura 4.- Distribución del pH (1994-2002)

SO₄⁻: El Temporal 1994 mostró una distribución de SO₄⁻ homogénea en la ZMG (concentraciones altas) a excepción de la región Norte (concentraciones bajas). Los niveles variaron entre 3.3 y 6.3 mg/L. En 1995 se presentó un comportamiento inverso a 1994. Las concentraciones más altas se localizaron en la región Noreste de la ZMG. En 1996 las concentraciones variaron entre 5.15 y 7.15, siendo las regiones Noreste y Suroeste las que presentaron niveles más altos. En 1997 se mostró variaciones entre 4.65 y 7.45; las concentraciones más altas se localizaron en zonas puntuales. En 1998 las concentraciones variaron de 5.2 a 7.0 mg/L. Las zonas Norte y Sur presentaron los niveles más altos. En 1999 se presentaron altas concentraciones en la región Este, Noreste y Sureste, variando entre 3.8 y 9.3. Por su parte, el año 2000 presenta un comportamiento homogéneo. Las concentraciones se mantuvieron entre 3.45 y 5.70. El 2001 mostró en las zonas Centro y Noroeste, las concentraciones más altas, sin embargo, se siguió manteniendo la escala con respecto al año anterior. La distribución en el temporal 2002 mostró concentraciones entre 3.6 a 5.9; los niveles más altos correspondieron a las zonas Centro y Norte, y los más bajos al Noroeste. El promedio del periodo (1994-2002) no permitió observar un patrón bien definido en la distribución de concentraciones de SO₄⁻ (Fig. 5).

Cl⁻: El Temporal 1994 mostró una distribución de concentraciones de Cl⁻ homogénea en la ZMG. La escala se mantuvo entre 5.33 y 6.03. Los niveles más altos correspondieron a la

región Norte y Sur. En 1995 se incrementaron las concentraciones considerablemente (6.4-8.7). Nuevamente la región Norte y Sur mostraron las concentraciones más altas. El año 1996 se mantuvo entre 6.53 y 7.93. La región Noreste de la ZMG fue la que presentó los niveles más altos. En 1997 se presenta una distribución homogénea de altas concentraciones. La zona mas afectada fue el Sur de la ZMG. En 1998 se muestra una distribución uniforme. En 1999 la mayor concentración se localizó hacia el Este y en menor medida hacia el Oeste. El 2000 mostró ligeras variaciones entre las concentraciones, siendo la distribución más uniforme con respecto a los demás temporales. El 2001 mostró una distribución bien definida orientada hacia el Oeste de la ZMG. El 2002 se caracterizó por un fuerte incremento en las concentraciones en comparación con los demás años en el Norte y Noroeste de la ZMG.

En resumen, la distribución promedio en la concentración de Cl^- durante todo el estudio (1994-2002), mostró un comportamiento uniforme. El promedio reflejó que cada año tuvo sus ligeras variaciones a excepción del temporal de año 2002, y por tanto, no existió un patrón definido en las distribuciones (Fig. 6).

NO_3^- : Las concentraciones de NO_3^- durante el temporal 1999 mostraron una distribución orientada hacia el Oeste con niveles altos (1.35 mg/L) y una zona de niveles bajos al Norte de la ZMG (0.93 mg/L). Este año refleja correspondencia con niveles altos de acidez (Fig. 7).

El temporal del año 2000 permitió visualizar una distribución dominante de niveles altos hacia el Sur y Suroeste de la ZMG. La escala osciló entre 1.01 y 1.23 mg/L. La distribución en el temporal 2002 mostró que la región Centro de la ZMG es la más afectada con concentraciones altas de NO_3^- (1.19), mientras que el resto de la ZMG presentó los niveles bajos (1.0).

CONCLUSIONES GENERALES

1. La contaminación atmosférica en la ZMG ha modificado la naturaleza química de la lluvia que precipita en esta región.
2. Aunque se encontró que la frecuencia de lluvia ácida ha disminuido, la concentración ácida fue mayor.
3. Los años 1996, 1997 y 1998 presentaron distribuciones del pH más homogéneas en comparación con 1994 y 1995. El temporal 1999 mostró correspondencia de altos

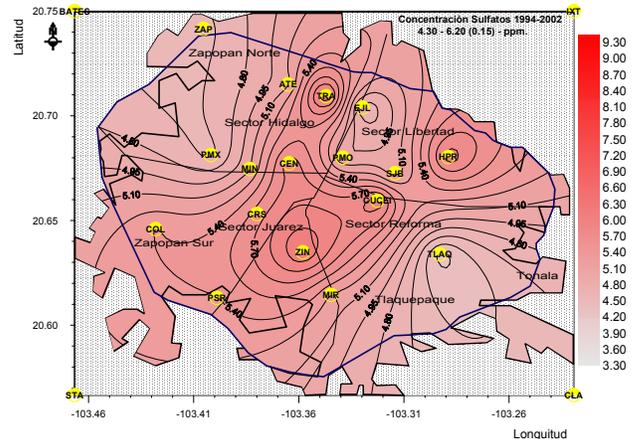


Figura 5.- Distribución de SO_4^- (1994-2002)

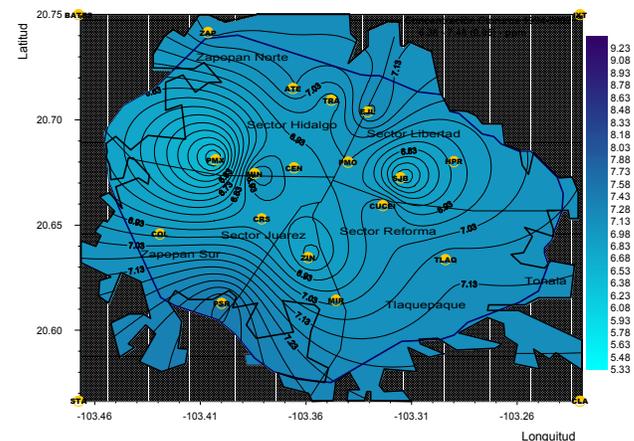


Figura 6.- Distribución de Cl^- (1994-2002)

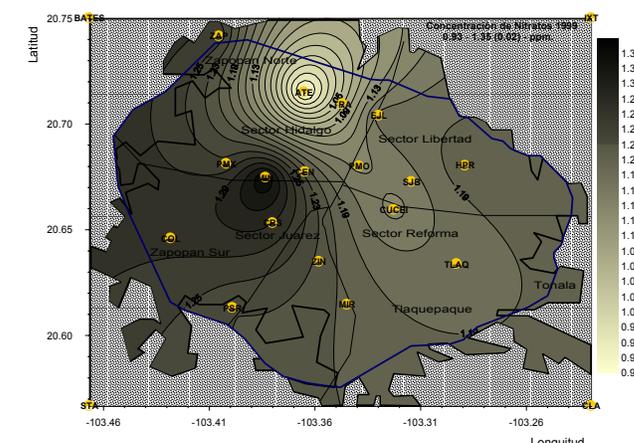


Figura 7.- Distribución de NO_3^- en 1999

niveles de acidez con grandes concentraciones de SO_4^- principalmente en la región Noreste, Este y Sureste de la ZMG.

4. La distribución promedio ponderada de todo el periodo (1994-2002) definió a la región Oeste como la más ácida.
5. Los temporales 2000, 2001 y 2002 fueron los que presentaron las concentraciones de SO_4^- más bajas, mientras que el temporal de 1999 presentó las más altas.
6. El temporal 1999 se caracterizó por tener correspondencia entre los 4 parámetros (pH, SO_4^- , Cl^- y NO_3^-), sobretodo en las regiones Este y Oeste de la ZMG.
7. Se observó una gran variabilidad en las concentraciones de Cl^- durante todo el periodo de análisis, por lo que no se estableció un patrón final bien definido.
8. Los resultados finales de Cl^- del temporal 2002 mostraron las concentraciones más altas de todo el periodo de estudio (región Norte y Noroeste); además, se define una mayor variabilidad entre los datos (2.37 mg/L).
9. El temporal del año 2000 se caracterizó por ser el más uniforme de todo el análisis de Cl^- , ya que la variación entre la concentración mayor y menor fue de 0.5 mg/L.
10. La dinámica de vientos influye en el comportamiento y dispersión de contaminantes y por ende de la lluvia ácida, lo cual es claramente observable en el parámetro de pH, mientras que en los otros parámetros no esta claramente definida su influencia.

BIBLIOGRAFIA

1.
 - Manahan, S., 1991; Environmental Chemistry, Fifth edition, Lewis publishers inc.
 - Caselli, M., 1992; La Contaminación Atmosférica. Causas y efectos: Efectos sobre el clima, la vegetación y los animales. Siglo XXI editores; 91-96.
 - Hare, T., 1994; La lluvia ácida., Ediciones SM. Joaquín Turina 39 28044 Madrid.
2. Gallardo et. al., 1999; Gobierno del D.F./Secretaría del medio ambiente/Dirección general de prevención y control de la contaminación/Red automática de monitoreo atmosférico-RAMA-.
3.
 - Smith, A., 1872; Los indicios de la climatología química- (Profra. Ligia Kamss Paniagua Coordinadora de las Estaciones Meteorológicas de la ENP Plantel 3 "Justo Sierra" -<http://dgenp.unam.mx/chaac/lluvia.html>).
 - Valroff, J., 1985, Pollution atmospherique et pluie Acides, Francais, Paris, 11-12.
4. Valroff, J., 1985, Pollution atmospherique et pluies Acides, Francais, Paris., 11-12.
5.
 - Davis, C., Mackenzie, L., 1981; Introduction to Enviromental Engineering., Editorial Mc Graw Hill, USA New York.
 - Erickson, J., 1991; Las Tormentas de las antiguas creencias a la moderna Meteorología, Serie Mc Graw Hill / Interamericana de España, S.A. (Madrid) 104-106.
 - Manahan, S., 1991, Environmental Chemistry, Fifth edition, Lewis publishers inc.
 - Turk, A., Wittes, J., 1982; Tratado de Ecología., ed. Interamericana, 388-390.
 - Dickson, T., 1994; Química, enfoque ecológico, Limusa-Noriega, 219-221.

- Seinfeld, J., Pandis, S., 1997; Atmospheric chemistry and physics from Air Pollution to climate change, John Wiley and Sons, N. Y. Sciences., Second ed. Cambridge environmental chemistry Series |7, 1030-1064.
- 6. Departamento del Distrito Federal-Secretaría del Medio Ambiente-Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación-Dirección de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico, 1999; Informe anual.
- 7. Díaz, G. S., 1934; Informe sobre el análisis de una muestra de agua de lluvia-Facultad de Ingeniería y Ciencias Químicas-Palacio legislativo, Guadalajara, Jalisco.
- 8. Briseño, J., 1993; Lluvias ácidas en Guadalajara 1984–1992, Boletín–IAM-UdeG.
- 9. Comisión estatal de ecología (COESE)- Secretaría del medio ambiente para el desarrollo sustentable (SEMADES), 2003-
<http://www.semades.jalisco.gob.mx/index.htm>.
- 10. García E., 1988; Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, UNAM, México.
- 11. González, R., 1995; Proyecto piloto para la creación de una normatividad ambiental metropolitana. Ecología Estatal de Jalisco.
- 12. Gobierno del Estado de Jalisco, SEMARNAP, S.S, 1997. Programa para el mejoramiento de la calidad del aire en la ZMG, 1997-2001, pag. 111.
- 13. Brimblecombe, P., 1996; Air Composition & Chemistry, Second ed., Cambridge environmental chemistry Series |6, 83-89, 92-100, 174-77, 4863-77.
- 14. Mellanby K., 1991; Air pollution, Acid rain and the Environment - The Watt Committee on Energy by Elsevier Applied Science, London and New York.
- 15. Peden, M., Skowron, B., 1978; Ionic Stability of Precipitation Samples. Atmos. Environ. Vol.12., pp. 2313-2319.
- 16. APHA-American Public Health Association; AWWA-American Water Works Association, WPCF-Water Pollution Control Federation, 1998; Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater, Editions Díaz de Santos, España, Madrid, 2-33,4-77,4-233.
- 17. Manual para aguas potables y residuales-SIW-1, Catálogo 24960 (Hach, 1995).