

Los sistemas de información geográfica como herramienta para observar el comportamiento del ozono en la Zona Metropolitana de Guadalajara

Martha Cecilia Nájera Cedillo ¹, Bertha Márquez Azúa ², Rubén Sánchez Gómez ³, Juan P. Corona ⁴

1. Departamento de Física, CUCEI, Universidad de Guadalajara, cecyn@yahoo.com.mx

2. Departamento de Geografía, CUCSH, Universidad de Guadalajara, bmarquez@cencar.udg.mx,
(01-33) 38193381 ext. 3445

3. Departamento de Matemáticas, CUCEI, Universidad de Guadalajara, rsanchez@ccip.udg.mx, (01-33) 36199552

4. Departamento de Geografía, CUCSH, Universidad de Guadalajara, autlann@hotmail.com, (01-33) 38193381

RESUMEN

El comportamiento del ozono urbano en la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG) está influenciado por sistemas anticiclónicos que producen estabilidad atmosférica e intensa radiación solar. Dichos sistemas, aunados a las características geográficas y meteorológicas de la ciudad propician una atmósfera altamente foto-reactiva que favorecen la concentración de niveles altos de contaminantes atmosféricos en general y de ozono en particular que, con frecuencia, sobrepasa las normas de calidad del aire.

En este trabajo, se muestra un análisis del comportamiento del ozono troposférico, utilizando los datos registrados en la Red Automática de Monitoreo Ambiental, y su relación con las condiciones geográficas de la ZMG. Se utiliza un Sistema de Información Geográfica (SIG) para analizar desde una perspectiva espacio-temporal la información disponible. Se observa que las concentraciones de ozono el 17 de octubre de 1996 en la zona de estudio no fueron homogéneas y se identifican regiones con niveles de concentración altos. El SIG es una herramienta que ayuda a visualizar el desempeño espacio-temporal del ozono urbano que, con datos en tiempo real, puede ayudar a tomar medidas preventivas.

Palabras clave: ozono urbano, SIG.

ABSTRACT

The behavior of the urban ozone in the Metropolitan Zone of Guadalajara, Jalisco (ZMG) is controlled by anti cyclonic systems that produce atmospheric stability and intense solar radiation. Such systems are influenced by the geographic and meteorological characteristics of the city. By consequence, the ZMG shows a highly photo reactive atmosphere that favors the concentration of atmospheric pollutants, and the ozone in particular, being the last frequently over the quality standards.

An analysis of the behavior of the tropospheric ozone and its relation with the geography of the ZMG is presented by using the information of the Automatic Environmental Monitoring Network (Red Automática de Monitoreo Ambiental -RAMA). A Geographic Information System (GIS) is used to analyze the data form RAMA under a spatial and temporal perspective. It is observed that the concentrations of ozone on October 17, 1996 were not homogeneous and some regions with high levels of concentration were identified. It is shown that GIS is a useful tool to visualize the behavior of ozone of urban origin. If this technique is used in real time it should help to inform the community about potential risks.

Key words: urban ozone, GIS.

Cita: Nájera Cedillo, M.C., Márquez Azúa, B., Sánchez Gómez, R. y Corona, J.P., 2005, Los sistemas de información geográfica como herramienta para observar el comportamiento del ozono en la Zona Metropolitana de Guadalajara, GEOS, Vol. 25, No. 2.

INTRODUCCIÓN

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) complementa la forma definida en el plano de cualquier localidad específica, con los datos disponibles en sus atributos temáticos asociados, es decir, combina información cartográfica y bases de datos en forma simultánea, estableciendo una sola base de datos. Esta capacidad de asociación de bases de datos temáticos con la descripción espacial de objetos geográficos y las relaciones entre los mismos, marca la diferencia entre un SIG y otros sistemas informáticos. Esta característica del SIG permite obtener en forma esquemática el desempeño de una variable en función de su magnitud; en este estudio en particular el análisis de la magnitud de la concentración de contaminantes en el aire, como el ozono troposférico es de gran interés, por sus efectos dañinos a la población y al medio ambiente cuando se tienen altas concentraciones, así como para establecer medidas preventivas y/o correctivas.

Por los daños que genera el ozono, el crecimiento urbano y las características geográfico-meteorológicas adversas presentes en la zona metropolitana de Guadalajara (ZMG), se podría pensar que existen varios trabajos de investigación acerca del ozono en la zona de interés. No obstante, en la literatura se pueden encontrar pocos trabajos, entre ellos: Tereshchenko y Filonov (1997), en donde se analiza una observación extrema de ozono buscando argumentar posibles causas atmosféricas que pudieron provocar la presencia de estos valores; Sánchez (2001) y Sánchez et. al. (2001), que presenta dos estudios detallados de tendencia temporal de excedencias de O_3 arriba de la norma (110 ppb).

En este trabajo se presenta un análisis del comportamiento de las concentraciones de ozono en la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG) utilizando los datos que registra la Red Automática de Monitoreo Ambiental (RAMA). Con la información en forma vectorial en el SIG, se obtiene una apreciación visual amplia y detallada del desempeño del ozono (O_3) en la ZMG, logrando diferentes análisis desde una perspectiva espacio-temporal y planteando algunas hipótesis sobre este contaminante. El paquete utilizado es el ARC-VIEW (versión 2), integrando el trabajo en tres módulos: el primero es la cartografía base que contiene topografía,

hidrología, toponimia, traza urbana y usos del suelo entre otras capas; el segundo módulo son los datos de ozono con su capa temática y el tercer módulo lo conforman los resultados con la cartografía e interpolación espacial.

Para establecer la relevancia de un estudio de ozono urbano en la ZMG, a continuación se describen brevemente conceptos básicos de ozono y sus efectos, la zona de estudio y los datos disponibles en este trabajo de investigación.

El ozono troposférico

El ozono (O_3) es un gas altamente reactivo que se encuentran en la tropósfera y en la estratósfera. Este alótropo formado por tres átomos de oxígeno en cada molécula, se presenta en niveles altos en la tropósfera como resultado de las reacciones fotoquímicas involucradas con la contaminación antropogénica.

En la Figura 1 se presenta el perfil vertical de presencia de O_3 en la atmósfera; en esta figura se puede observar que hay presencia de O_3 en la parte más baja de la atmósfera en proporciones muy reducidas, usualmente unas pocas decenas de partes por billón (ppb) en razón de mezcla (moléculas de O_3 /moléculas de aire, en donde 10 ppb equivale a 2.5×10^{11} moléculas/cm³ al nivel del mar y 298°K), mientras que en la capa

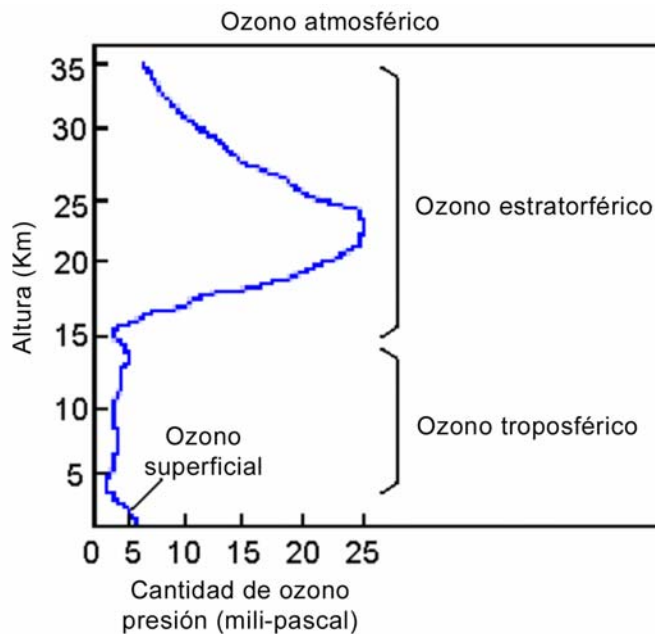


Figura 1. Concentraciones naturales de ozono en la atmósfera.

atmosférica que va de los 19 a los 48 km se tiene mayor contenido en ozono, producto de la radiación solar ultravioleta.

El aspecto más crítico del problema de ozono troposférico es su formación en áreas urbanas grandes, en donde, bajo ciertas condiciones meteorológicas, emisión de óxido nítrico y dióxido de nitrógeno (NOx) y componentes orgánicos volátiles (VOCs), pueden resultar en concentraciones de ozono tan altas como de 200-400 ppb, cuando internacionalmente el valor límite tolerable es de 110 ppb. Es importante señalar que el tiempo máximo aceptable de exposición a una concentración promedio de 110 ppb (Tabla 1) no debe

produce efectos tóxicos en las personas y en los animales, ya que es irritante del tejido pulmonar; debido a su baja solubilidad en el agua, el ozono inhalado penetra hacia el interior del pulmón, alcanzando las mayores dosis por unidad de superficie en los bronquios terminales y conductos alveolares (Moreno, 2003).

El ejercicio físico incrementa la dosis recibida, por lo que se cree que el sector de la población potencialmente más expuesto al ozono está constituido por las personas que realizan con frecuencia actividades físicas al aire libre. Se han realizado numerosos estudios en voluntarios sobre el efecto en el sistema respiratorio de la exposición a ozono en bajas concentraciones,

Tabla 1. Valores normados para los contaminantes del aire de México (Diario Oficial de la Federación, 23 de diciembre de 1994)

Contaminante	Valores límite		
	Exposición aguda		Exposición crónica
	Concentración y tiempo promedio	Frecuencia máxima aceptable	(Para protección de la salud de la población susceptible)
Ozono (O ₃)	0.11 ppm (1 Hrs.) (216 mg/m ³)	1 vez cada 3 años	-
Monóxido de carbono (CO)	11 ppm (8 Hrs.) (12595 mg/m ³)	1 vez al año	-
Bióxido de azufre (SO ₂)	0.13 ppm (24 Hrs.) (341 mg/m ³)	1 vez al año	0.03 ppm (media aritmética anual)
Bióxido de nitrógeno (NO ₂)	0.21 ppm (1 Hrs.) (395 mg/m ³)	1 vez al año	-
Partículas suspendidas totales (PST)	260 mg/m ³ (24 Hrs.)	1 vez al año	75 mg/m ³ (media aritmética anual)
Partículas con diámetro menor a 10 µm (PM10)	150 mg/m ³ (24 Hrs.)	1 vez al año	50 mg/m ³ (media aritmética anual)
Plomo (Pb)	-	-	1.5 mg/m ³ (promedio aritmético en 3 meses)

exceder más de una hora y solamente una vez cada 3 años (Diario Oficial de la Federación del 23 de diciembre de 1994).

El interés particular en O₃, radica en los daños que puede ocasionar a la gente, plantas y animales sometidos a altas concentraciones de este contaminante, ya que cuando hay acumulación de este gas o bien de otros oxidantes, como peróxidos, en las capas bajas de la atmósfera se producen efectos nocivos para la salud: irritación en los ojos y membranas mucosas. Investigaciones recientes indican que el ozono

similares a las encontradas en ambientes urbanos contaminados (Lippmann, 1992). Los resultados de esos estudios afirman que ocurre una disminución progresiva de la función pulmonar durante el periodo de exposición al ozono. Los efectos del ozono son de tipo morfológico, funcional, inmunológico y bioquímico.

La exposición al ozono en el ser humano tiene una fuerte componente estacional, ya que se produce más en el verano, cuando la radiación solar es más intensa, y además aumenta el periodo medio de estancia al aire libre (Moreno, 2003).

La comunidad científica tiene fuertes razones para creer que las concentraciones de ozono troposférico se están incrementando en regiones urbanas extensas de latitudes medias, ya que durante la década pasada mostró un incremento aproximado al 1% anual en Europa (WMO, 1990).

Por lo anterior, se deben implementar programas para tratar de reducir los niveles de concentración de ozono en el aire, y la forma de medir el efecto de estos programas es monitorear los registros de ozono en el tiempo para detectar algún tipo de tendencia (Sánchez et al. 2001).

Condiciones meteorológicas que influyen en los niveles de ozono.

Además de las reacciones químicas que se presentan en la atmósfera, ciertas variables meteorológicas también contribuyen a concentraciones altas de O_3 ; esto quiere decir que, aún si las emisiones diarias de precursores de O_3 fueran constantes todos los días, ciertas condiciones meteorológicas provocarían distintos niveles de las concentraciones diarias de O_3 . De hecho, las variaciones diarias del clima son la mejor explicación de los cambios día a día en las concentraciones de O_3 (EPA 1999).

Entre las condiciones favorables a concentraciones altas de O_3 , sobresale el fenómeno conocido como inversión térmica, que se caracteriza por un cambio en el perfil vertical normal de temperatura. La temperatura del aire disminuye conforme se incrementa la altura, de tal manera que en una atmósfera normal hay una disminución de 0.64 a 1° C cada 100 metros en la zona más próxima a la superficie de la tierra (troposfera). Este gradiente térmico "normal", se ve alterado bajo determinadas condiciones orográficas y climatológicas, de manera que la temperatura del aire es superior a la de una altura inferior, como se ejemplifica en la figura 2. Este fenómeno incrementa la estabilidad atmosférica impidiendo la dispersión vertical de los contaminantes vertidos en la atmósfera por industrias, calefacciones, motores de explosión, actividades urbanas, etc. Es así como las inversiones térmicas actúan como fronteras naturales que frenan los desplazamientos ascendentes de la atmósfera. En efecto, el aire no puede elevarse en una zona de inversión, puesto que es más frío y, por tanto, más denso

que el aire de la zona superior a la frontera de inversión. Las inversiones térmicas pueden atrapar nubes, humedad, contaminación y polen de capas próximas a la superficie, pues interrumpen la elevación del aire desde las capas bajas. Cuando la velocidad del aire es baja a consecuencia de la inversión, los gases antropogénicos y otros contaminantes naturales no se dispersan, alcanzando concentraciones elevadas, sobretudo en torno a centros urbanos, tales como la Zona Metropolitana de Guadalajara. Cabe mencionar que, en la ZMG más del 80% del año se presentan

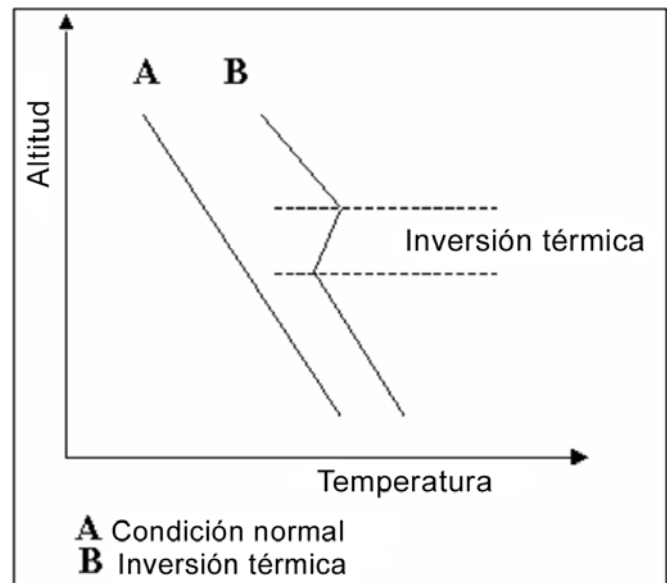


Figura 2. Esquema de inversión térmica.

inversiones térmicas (Tereschenko y Sánchez, 1997) y estas inversiones de temperatura pueden ser duraderas bajo un sistema estacionario de altas presiones unido a una baja velocidad del viento. Un periodo de tan sólo tres días de escasa mezcla atmosférica puede llevar a concentraciones elevadas de productos peligrosos en áreas de alta contaminación y, en casos extremos, producir enfermedades crónicas e incluso la muerte.

La zona de estudio

La ZMG se ubica en el centro del Estado de Jalisco a una latitud de 20°39'54" N, longitud de 103°18'42" W y a una altitud promedio de 1,540 metros sobre el nivel medio del mar (Figura 3). Comprende los municipios de Guadalajara, Zapopan, Tlaquepaque y Tonalá; está situada en la cuenca del Valle del Río Grande de Santiago, en los Valles de Atemajac y la Planicie de Tonalá, entre las zonas montañosas de la

Sierra Madre Occidental y el Cinturón Volcánico Transmexicano.

Las montañas que circundan la ZMG son: al noroeste la Sierra de San Esteban; al sureste, la Serranía de San Nicolás y los conjuntos montañosos Cerro Escondido-San Martín y el Tapatío-La Reyna; al sur, el Cerro del Cuatro-Gachupín-Santa María; y al oeste, la Sierra de la Primavera. Estas sierras constituyen parcialmente una barrera física natural para la circulación del viento, impidiendo el desalojo del aire contaminado fuera de la ciudad. (Programa para mejoramiento la calidad del aire en la Zona Metropolitana de Guadalajara, 1997).

La ZMG, se encuentra afectada por la afluencia de aire marítimo tropical y está sujeta a la influencia de sistemas anticiclónicos, generados en el Golfo de México y en el Océano Pacífico, estos sistemas ocasionan gran estabilidad atmosférica inhibiendo la mezcla vertical del aire generando poca ventilación. Se recibe abundante radiación solar debido a su latitud (20° N), lo que provoca que la atmósfera sea altamente fotorreactiva; y en

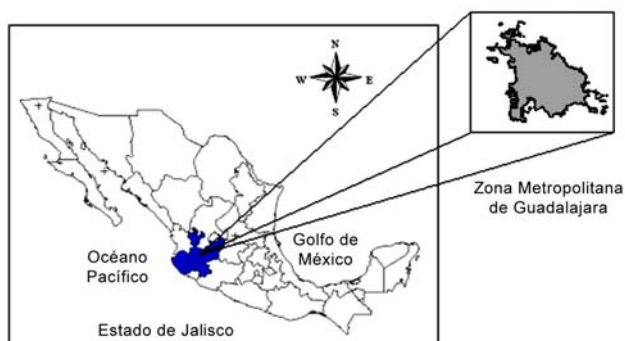


Figura 3. Localización de la Zona Metropolitana de Guadalajara.

presencia de luz solar, los hidrocarburos y los óxidos de nitrógeno reaccionan fácilmente para formar ozono y otros oxidantes. (Programa para mejoramiento la calidad del aire en la Zona Metropolitana de Guadalajara, 1997). En resumen, la ZMG tiene características geográfico-meteorológicas que influyen de manera determinante en el comportamiento de las concentraciones de contaminantes y en particular del ozono, dado que la evolución de los niveles de ozono es el resultado de la interacción de un conjunto de factores en los que destacan el comportamiento de sus precursores, como lo son hidrocarburos (HC), NO_x y la evolución del clima.

DATOS DISPONIBLES

Los datos utilizados son observaciones horarias registradas en las 8 estaciones de la Red Automática de Monitoreo Ambiental (RAMA) en el área de la ZMG (Figura 4). La serie de tiempo comprende desde noviembre de 1995 hasta agosto del 2004; estos datos constan de mediciones horarias de monóxido de carbono (CO), óxido de Nitrógeno (NO₂, NO_x), ozono (O₃), Partículas con diámetro menor a 10 μm (PM10), Humedad Relativa (RH), dióxido de azufre (SO₂), hidrocarburos (THC, MHC), temperatura (TMP), dirección (WDR) y velocidad (WSP) del viento. Nominalmente se tendrían 74520 datos; no obstante hay en promedio 74511 valores por estación, ya que algunos valores se perdieron cuando el equipo estuvo fuera de servicio.

En la Figura 5 se muestra por ejemplo la serie temporal de la concentración de O₃ en la estación Vallarta, en donde la línea horizontal indica el valor umbral o máximo permitido (Sánchez et al., 2001). Se puede observar que la serie presenta un gran número de días por arriba del umbral y que el 17 de octubre de 1996 se registró el máximo de concentración (311 ppb) de toda la serie con una desviación estándar de 23.8129.

Este es el motivo principal por analizar los datos registrados en esta fecha, es decir, se presentó un caso anómalo de concentraciones de O₃ superiores a los 110 ppb en todas las estaciones de la red y manteniéndose

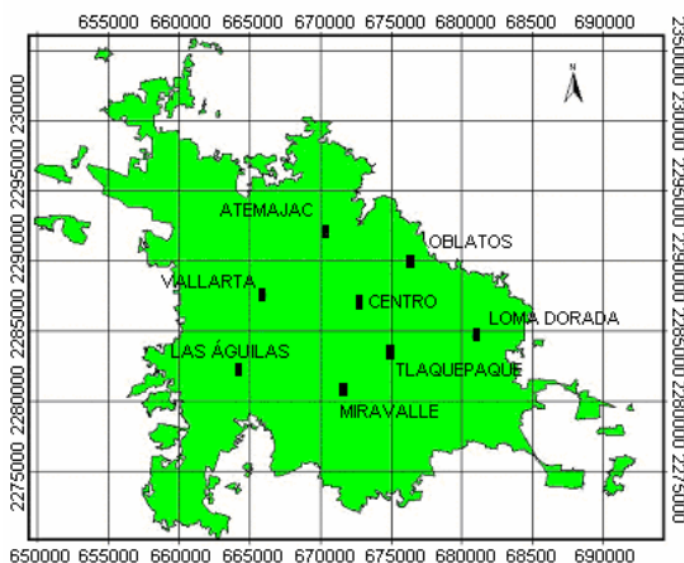


Figura 4. Localización de las 8 estaciones de monitoreo ambiental en la Zona Metropolitana de Guadalajara.

por más de 3 horas después del medio día, en donde el valor máximo absoluto fue registrado en la estación Miravalle (Figura 4) a las 16 hrs con 311 ppb y desde las 14 hrs se sobrepasó la norma en todas las estaciones excepto en la de Oblatos; este fenómeno se extendió hasta las 18 hrs, sobrepasándose la norma a las 17 hrs. en todas las estaciones de monitoreo ambiental de la ZMG (tabla 2).

METODOLOGÍA

Como primer paso, para localizar las estaciones en un mapa de la ZMG, se disponía únicamente de las direcciones de cada estación; entonces fue necesario crear una tabla (Tabla 3) con valores que contienen los objetos geográficos.

Esta tabla se construye a partir de las ortofotos,

mapas y toponímicos disponibles, que permitieron localizar puntualmente cada estación de la RAMA en la ZMG (Figura 6).

Enseguida, se procedió a integrar los valores registrados de ozono cada hora, en la fecha de estudio (Tabla 4).

Con el procedimiento descrito hasta este momento, se han incluido en el ArcView los valores observados de concentración de O₃ en ocho puntos localizados en la región de interés. Sin embargo, se quiere conocer además una estimación del comportamiento del ozono en toda la ZMG, es decir, obtener una estimación de la concentración en los puntos vecinos a los valores observados. Para lograr esto, el ArcView tiene en su herramienta de interpolación espacial tres alternativas: Spline, IDW y Kriging, de los cuales el método utilizado en este trabajo fue Kriging, ya que es la herramienta que provee una estimación del valor de un proceso aleatorio en una región específica, a partir de un conjunto de datos registrados en algunos puntos (Cliff y Ord, 1975); el método Kriging permite obtener un valor aproximado Z_k^* de un atributo en un

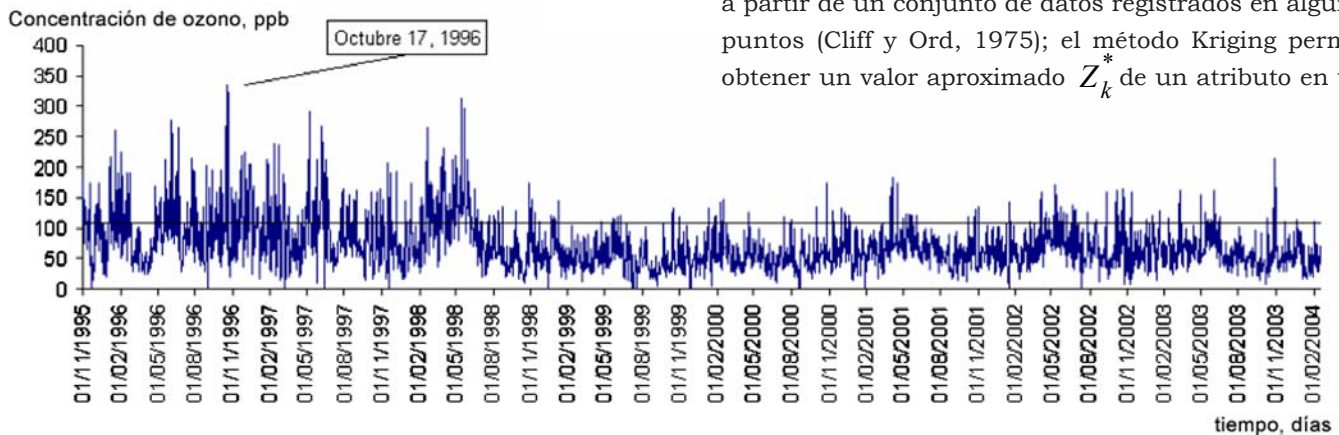


Figura 5. Serie temporal de los niveles de concentración de ozono de la estación Vallarta. La línea horizontal indica el valor umbral (110 ppb); el 17 de octubre de 1996 se registró el máximo de concentración (311 ppb) de toda la serie.

Tabla 2 Valores de ozono (ppb) en las estaciones de la RAMA de las 14 a las 18 Hrs del 17 octubre de 1996.

ESTACIÓN	14 hrs	15 hrs	16 hrs	17 hrs	18 hrs
Centro	158.0	113.0	117.0	112.0	88.0
Oblatos	0.0	97.0	77.0	142.0	106.0
Miravalle	124.0	310.0	331.0	295.0	265.0
Aguilas	149.0	207.0	199.0	180.0	76.0
Vallarta	291.0	262.0	249.0	167.0	75.0
Atemajac	291.0	238.0	192.0	167.0	130.0
Tlaquepaque	184.0	228.0	200.0	193.0	206.0
Loma Dorada	117.0	162.0	222.0	183.0	127.0

Tabla 3. Atributos de estaciones de la Red Automática de Monitoreo Ambiental (RAMA) de la Zona Metropolitana de Guadalajara

Shape	ID	Estación	X-coord	Y-coord	Altura	Ubicación
Point	1	Centro	673626.44458	2286962.84396	1540	Calle Churubusco 143
Point	2	Oblatos	677358.65805	2289950.18289	1570	Avelino M. Presa 1685
Point	3	Miravalle	672550.83149	2280713.73864	1570	Av. Gobernador Curiel, Clínica
Point	4	Águilas	665055.75422	2282261.22440	1610	Av. López Mateos 5250
Point	5	Vallarta	666855.57069	2287566.58437	1600	Calle Coras, Plaza México
Point	6	Atemajac	671255.67644	2291986.64849	1520	Calle Zaragoza, U. Admón. Ate
Point	7	Tlaquepaque	675751.20170	2283335.40141	1560	Calle Constitución 159
Point	8	Loma Dorada	681676.69646	2284569.25578	1570	Calle Loma Plana, Registro Civ

sitio no muestreado a partir de las mediciones disponibles en puntos localizados dentro de la misma área o región incluyendo en el procedimiento efectos de variabilidad aleatoria, mediante la expresión

$$Z_k^* = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} Z_{\alpha}$$

en donde n es el tamaño de la muestra en cada punto de observación, λ_{α} son pesos que se calculan asegurando que el estimador no es sesgado y de varianza mínima; esto se logra con la condición

$$\sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} = 1.$$

En particular, el ArcView utiliza el método de Kriging universal, generando estimaciones lineales

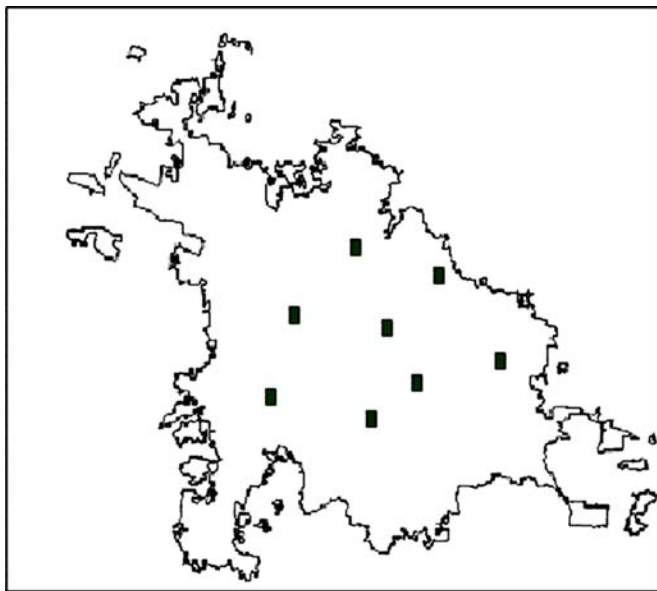


Figura 6. Zona Metropolitana de Guadalajara y las 8 estaciones de monitoreo ambiental.

insesgadas de las concentraciones en puntos no observados y una estimación de la covarianza o variograma en cada uno de ellos, dando la posibilidad de obtener una estimación del error cuadrático medio (ECM).

En la Figura 7 se pueden observar las interpolaciones espaciales Kriging desde las 12 hasta las 19 hrs., periodo en que inician y terminan las concentraciones mayores a 110 ppb. de ozono. Es importante resaltar que en la figura 7 se detectan algunas regiones con concentraciones de ozono similares, por ejemplo para en el cuadro de las 12:00 hrs la región noroeste de la ZMG tiene niveles de ozono superiores a la norma (110 ppb), mientras que en la región sureste los valores son aceptables de acuerdo a la norma. Se aprecian zonas con niveles persistentemente altos de ozono, por ejemplo la zona noroeste y suroeste muestran niveles altos durante un periodo de cuatro horas consecutivas. Se puede notar además la evolución horaria del ozono en el aire sobre la superficie de la ZMG, generando evidencia clara y observable para notificar a las autoridades y dependencias correspondientes.

CONCLUSIONES

Se analizó el comportamiento espacial del ozono troposférico para el día más extremo registrado durante el periodo de observaciones de la RAMA en la ZMG, el 17 de octubre de 1996, apoyados en el ArcView, resaltando que este SIG es un instrumento de apoyo indispensable para la caracterización y el diagnóstico del ozono en la ZMG.

Tabla 4. Atributos de cada estación; ozono en ppb del 17 de octubre de 1996.

Estación	hr.1	hr.2	hr.3	hr.4	hr.5	hr.6	hr.7	hr.8	hr.9	hr.10	hr.11	hr.12	hr.13	hr.14	hr.15	hr.16	hr.17	hr.18	hr.19	hr.20	hr.21	hr.22	hr.23	hr.24
Centro	16.0	17.0	22.0	20.0	22.0	21.0	16.0	10.0	10.0	10.0	17.0	48.0	126.0	158.0	113.0	117.0	112.0	88.0	33.0	18.0	10.0	9.0	9.0	0.0
Oblatos	20.0	25.0	29.0	30.0	28.0	19.0	9.0	7.0	0.0	2.0	14.0	49.0	98.0	0.0	97.0	77.0	142.0	106.0	69.0	39.0	16.0	4.0	12.0	0.0
Miravalle	6.0	4.0	4.0	4.0	4.0	3.0	4.0	8.0	6.0	4.0	12.0	27.0	63.0	124.0	310.0	311.0	295.0	265.0	68.0	48.0	8.0	4.0	5.0	0.0
Águilas	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	13.0	22.0	69.0	149.0	207.0	199.0	180.0	76.0	43.0	22.0	10.0	13.0	6.0	0.0
Vallarta	21.0	27.0	21.0	16.0	25.0	21.0	16.0	1.0	1.0	1.0	0.0	117.0	245.0	291.0	262.0	249.0	167.0	75.0	58.0	28.0	4.0	14.0	21.0	0.0
Atemajac	33.0	35.0	41.0	36.0	36.0	27.0	27.0	15.0	8.0	12.0	32.0	151.0	266.0	291.0	238.0	192.0	167.0	130.0	84.0	52.0	26.0	16.0	16.0	0.0
Tlaquepaque	9.0	10.0	9.0	11.0	16.0	14.0	11.0	9.0	9.0	9.0	13.0	33.0	89.0	184.0	228.0	200.0	193.0	206.0	61.0	23.0	10.0	9.0	10.0	0.0
Loma Dorada	5.0	5.0	6.0	6.0	12.0	13.0	7.0	5.0	10.0	10.0	13.0	35.0	79.0	117.0	162.0	222.0	183.0	127.0	108.0	20.0	6.0	5.0	5.0	0.0

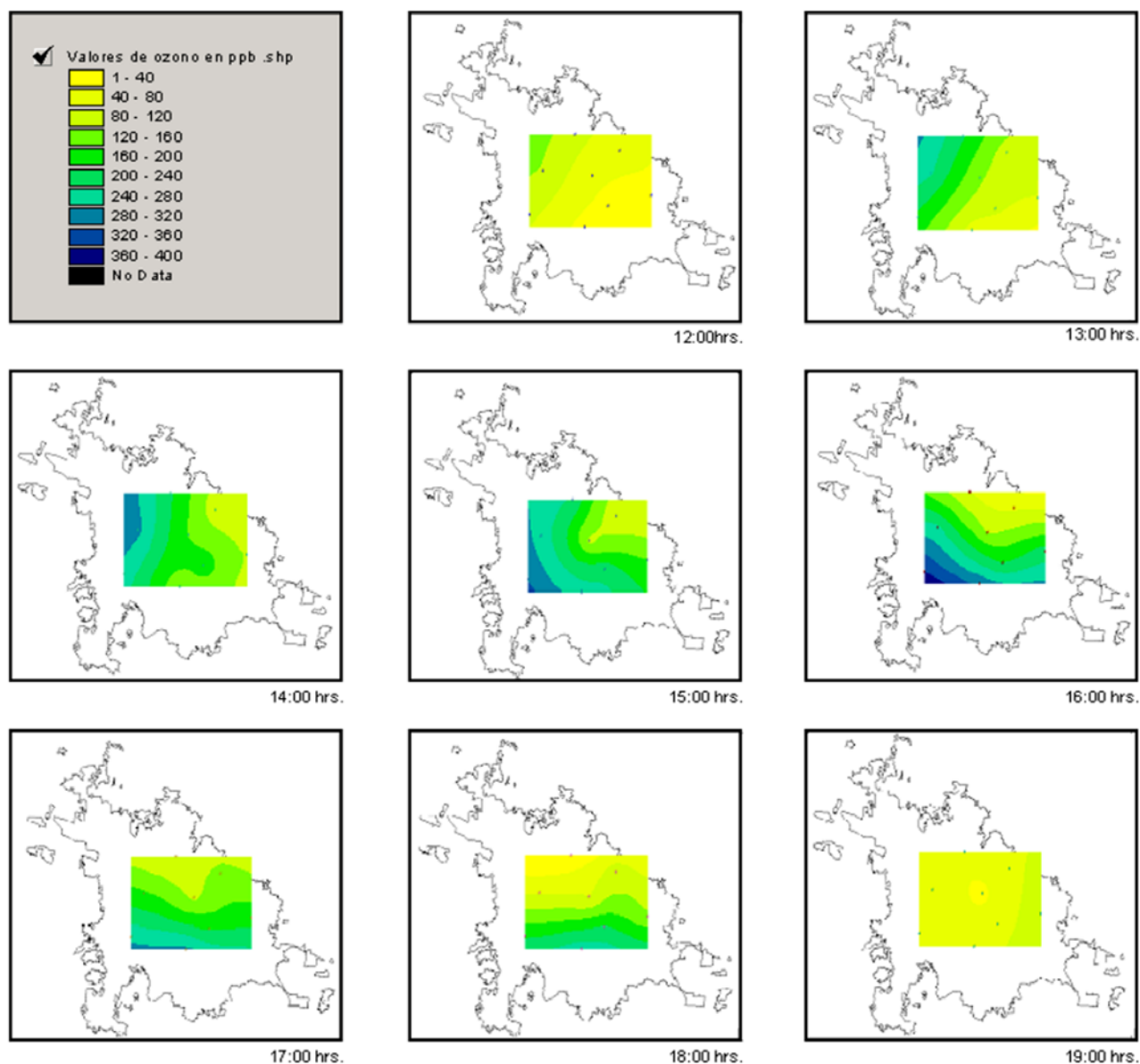


Figura 7. Interpolación espacial Kriging de las concentraciones de ozono registrado en la Zona Metropolitana de Guadalajara a distintas horas del día 17 de octubre de 1996.



Los análisis realizados permiten observar que las concentraciones de ozono en la ZMG no son homogéneas, es decir, que existen regiones que están sometidas a niveles más altos de ozono que otras, con lo que se tiene la posibilidad de difundir a la comunidad esta información para que se tomen las medidas pertinentes.

Se detecta que el SIG provee una herramienta visual que da la pauta para establecer hipótesis sobre el desempeño espacio-temporal del ozono urbano, de hecho, permite obtener estimaciones de las concentraciones de ozono en cualquier punto de la ciudad.

Finalmente, en este trabajo se presenta una metodología que genera resultados preliminares, utilizando un SIG que es aplicable tanto al ozono como a cualquier otro contaminante en la región de interés con el respaldo de una herramienta eficiente.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Secretaría del Medio Ambiente para el Desarrollo Sustentable en Jalisco, por facilitar los datos necesarios, en especial al Ing. Ramón Núñez González, Secretario de Medio Ambiente, y al Coordinador del Programa Red Automática de Monitoreo Atmosférico Ing. Ramón A. Limón Flores por su siempre cordial cooperación. De manera muy especial al Ing. Mario Alberto Martínez Director del Centro de Información Ambiental por su amable atención y su conversación informativa con respecto al monitoreo ambiental.

Así mismo se agradece al Dr. Heriberto Cruz Solís, Jefe del Laboratorio de Nuevas Tecnologías, en el Departamento de Geografía, CUCSH, Universidad de Guadalajara, por su inigualable cooperación. Y de manera muy especial al Dr. Luis A. Delgado-Argote, Departamento de Geología, CICESE, por su orientación y comentarios, tan acertados como apreciados, muchas gracias.

Finalmente, agradecemos las revisiones de dos árbitros anónimos, cuyas sugerencias ayudaron a mejorar el manuscrito.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cliff, A. D. and Ord, J. K., 1975, Model building and the analysis of spatial pattern in human geography, *Journal of the Royal Statistical Society*, Series B, 37, p. 297-328.
- Gobierno del Estado de Jalisco; Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, Secretaría Salud, 1997, *Programa para mejoramiento la calidad del aire en la Zona Metropolitana de Guadalajara 1997-2001*.
- Lippmann, M., 1992, Environmental Toxicants. *Human Exposures and Their Health Effects*. Ed. Van Nostrand Reinhold, Nueva York.
- Moreno Grau, María Dolores, 2003, Toxicología Ambiental. *Evaluación de riesgo para la salud humana*, Ed. Mc Graw Hill, p. 325-326.
- Sánchez, G. R. (2001). Análisis de tendencia en excedencias sobre un umbral alto, con aplicación en ozono urbano. *Disertación doctoral*, Colegio de Postgraduados, 152 pp.
- Sánchez, G. R, Cantú, S. y Vaquera, H., 2001, Uso del modelo de regresión Pareto generalizado para analizar tendencia temporal en las concentraciones de ozono en la Zona Metropolitana de Guadalajara, *Cuadernos de Investigación, CGEPI, Área I: Física-Matemáticas e Ingeniería*, Núm. 27, Universidad Autónoma de Coahuila, p.21-35.
- Tereshchenko, I.E. y Filonov, A.E., 1997, Acerca de las causas de las elevadas concentraciones de ozono en la atmósfera de la Zona Metropolitana de Guadalajara en Octubre de 1996, *GEOS*, Vol. 17, No. 2, p.54-59.
- Tereshchenko, I.E. y Sánchez Gómez, R., 1997, Resultados de los estudios de las inversiones térmicas sobre la ciudad de Guadalajara, México, *GEOS*, Vol. 17, No. 4, p. 195-196.
- U.S. Environmental Protection Agency, 1999, *Guideline For Developing An Ozone Forecasting Program* EPA-454/R-99-009, July, p. 2-6.
- WMO (United Nations Environment Program and World Meteorological Organization) (1990). Scientific Assessment of Ozone. Vol. I, *World Meteorological Organization Global Research and Monitoring Project*, Report No. 20, 486 pp.

Manuscrito recibido: 2 de agosto de 2005.

Manuscrito corregido recibido: 6 de marzo de 2006.

Manuscrito aceptado: 5 de abril de 2006