

Geof. Int. Vol. 18: 3, 1979, pp. 263-308

**ANÁLISIS ESPECTRAL DEL BIOXIDO DE AZUFRE EN LA
CIUDAD DE MEXICO Y SU RELACION CON ALGUNOS
PARAMETROS METEOROLOGICOS**

DIFTER KLAUS*
y ERNESTO JÁUREGUI**
(Received Jan. 4, 1980)

RESUMEN

Se utilizan los métodos de componentes principales y de espectro para examinar las variaciones espaciales y temporales del bióxido de azufre en el área urbana de la ciudad de México. El análisis demuestra que existe una periodicidad diurna en las variaciones de las concentraciones del SO₂. Estas variaciones están asociadas con distribuciones espaciales características (tipos 1 a 6) y pueden explicarse por medio de la circulación del aire superficial. Las correlaciones múltiples permiten la posibilidad de intentar un pronóstico a corto plazo de los niveles de concentración del SO₂ con datos del viento.

ABSTRACT

SO₂-time and spatial variations for the urban area in Mexico City are examined by means of the period and eigenvector analysis. Eigenvectors 1 to 6 explain 74 percent of the total variance of time series of SO₂. Significant periodic fluctuations in the time series of the first eigenvector are the 11.5 and 7.8 hour periods. By means of multiple correlation, equations are proposed to attempt short -period forecasts of SO₂ concentration levels in Mexico City.

* Instituto Geográfico de la Universidad de Bonn, Alemania.

** Instituto de Geografía, UNAM, México.

INTRODUCCION

Ubicada a una altitud de 2 250 m en la Meseta Central, la ciudad de México es en la actualidad uno de los centros urbanos más populosos en los trópicos. La acentuada concentración de la industria y de la actividad vehicular han dado por resultado una creciente elevación de los contaminantes en el aire urbano. La acumulación de contaminantes se acentúa por la desfavorable ubicación de la ciudad en un valle y por la frecuencia de situaciones de flujo anticiclónico en la estación seca (nov.-abr.).

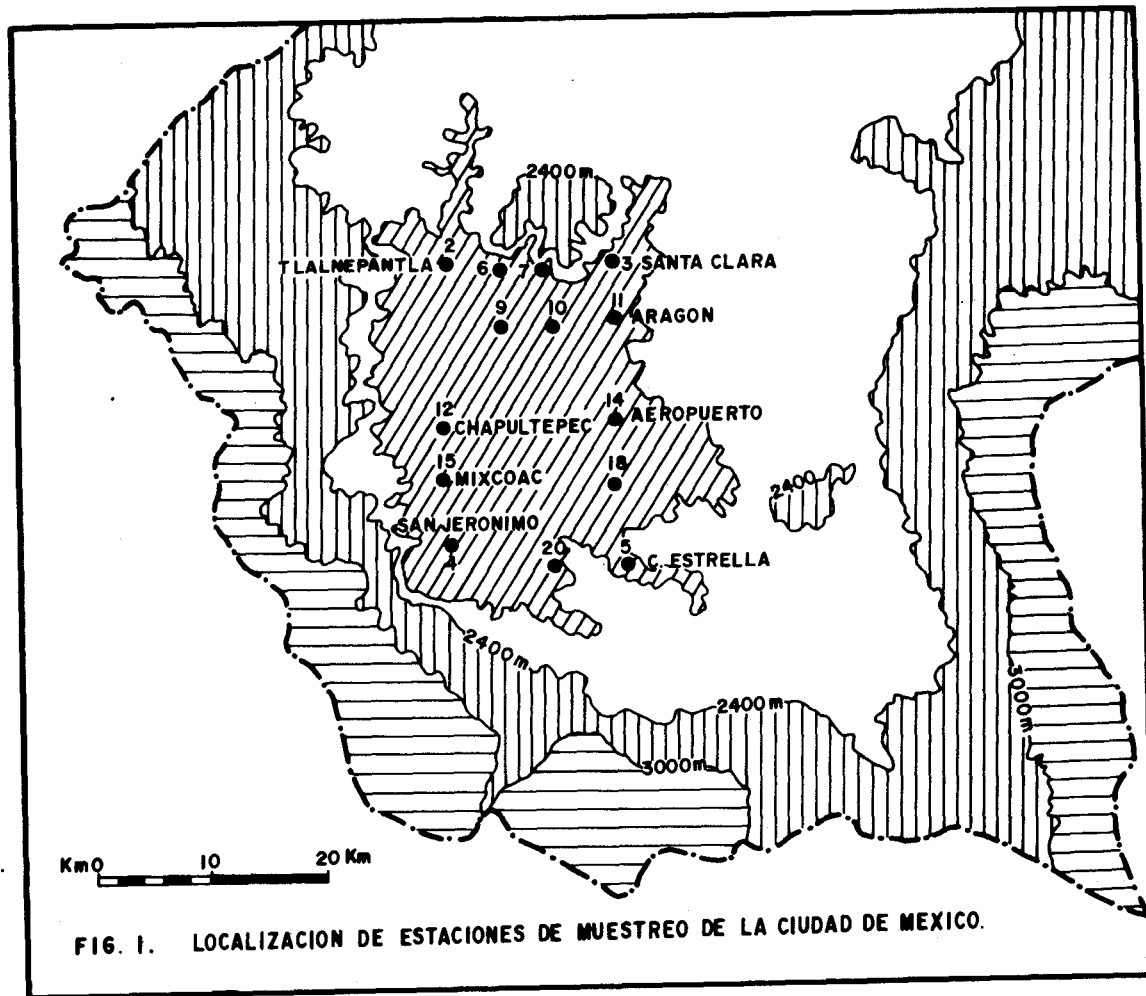
En el período 1937-1966 la transparencia del aire se ha ido deteriorando a medida que la ciudad ha ido creciendo a un ritmo acelerado. La visibilidad que al finalizar los años treinta era de unos 20 km. en promedio (al mediodía) ha disminuido y en los años sesenta alcanzaba en promedio unos 3-4 km. a la misma hora (Jáuregui, 1969). En los años sesenta el factor de turbiedad de Linke para la ciudad de México era casi un 25% superior al correspondiente al de Londres (Galindo, 1962; Jáuregui, 1963a).

En los últimos años, las autoridades sanitarias han puesto en marcha una red automática de muestreo del aire urbano, como parte del esfuerzo para controlar y reducir las emisiones de contaminantes en la ciudad. Entre los contaminantes que se observan cada hora en 16 puntos en forma automática se encuentra el SO_2 (Fig. 1). Además, en 5 estaciones de la red se registran datos horarios de temperatura, humedad, dirección e intensidad del viento, monóxido de carbono y polvo (fracción respiratoria). En el presente trabajo se utilizan los datos correspondientes al año 1976 y son los primeros con un grado de confiabilidad aceptable.

En un trabajo no publicado todavía (Jáuregui, Klaus y Lauer) se ha aplicado el método de las correlaciones espacio-tiempo para determinar la escala en que se realiza el transporte de SO_2 (y otros contaminantes atmosféricos) en la ciudad de México. En el presente estudio se intenta utilizar el método de componentes principales para examinar las variaciones del mencionado contaminante.

UBICACION Y SISTEMAS DE TIEMPO

En la Fig. 1 se muestra la ubicación de la ciudad de México ocupando la



porción SW del Valle que se encuentra bordeado al Oriente, Sur y Poniente por las Sierras Nevada, Ajusco y de las Cruces respectivamente.

El Valle se encuentra relativamente abierto a las masas de aire (en las secas) que vienen del Norte ya que en esa dirección las montañas son menos elevadas. Sin embargo, las montañas que forman la Serranía de Guadalupe y que estrangulan el Valle en su parte central constituyen una barrera que influencia la circulación local en el norte de la ciudad.

En presencia de gradientes débiles de presión se observa un flujo de aire frío de las laderas hacia el fondo del Valle al caer la tarde. El tejido urbano con sus construcciones reduce en cierta medida la intensidad de dichos vientos (catabáticos). La reducción de la radiación nocturna, la escasa ventilación así como la energía almacenada durante el día por edificios y pavimentos resulta en una "isla de calor" bien acentuada (Jáuregui, 1973a).

Los contrastes térmicos ciudad-campo llegan a ser con frecuencia de $5^{\circ} - 8^{\circ}\text{C}$.

El aire frío tiene usualmente una profundidad de 100-200 m (Jáuregui, 1973a). Arriba se encuentra aire más tibio lo que da por resultado una estabilidad pronunciada en las capas inferiores. Sobre la ciudad la isla de calor origina una elevación de la inversión cuya altura es necesariamente variable y que hasta la fecha no se ha medido. La energía proveniente de la ciudad por la noche mantiene una capa de mezclado vertical mínima por la noche que probablemente no sobrepasa la altura media de las construcciones.

Al amanecer el sol comienza a calentar el aire superficial y consecuentemente, la inversión se disuelve gradualmente desde abajo. A medida que se eleva la inversión la capa adiabática subyacente crece hasta llegar a la altura de la cima de la inversión y más allá, hasta alcanzar la altura de la inversión de los alisios que en enero por ejemplo se encuentran en promedio a unos 4 o 5 km. Es usual que la inversión superficial desaparezca antes del mediodía.

En la Fig. 2 se muestran las direcciones medias del viento (componente meridional) en enero. Puede apreciarse que no destaca en este mes en promedio una circulación simple en las 4 estaciones. En las estaciones del Norte de la ciudad (2 y 3) el viento catabático que desciende de la serranía de Guadalupe es reforzado por la isla de calor resultan-

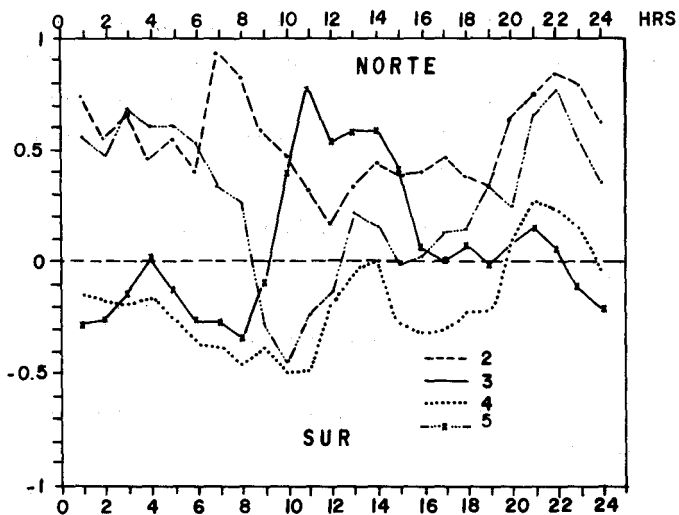


FIG. 2. DIRECCIONES HORARIAS DEL VIENTO (COMPONENTE MERIDIONAL) PARA LAS ESTACIONES 2 - 5 EN ENERO DE 1976.

do en vientos con componente del Norte; en cambio en las estaciones 4 y 5 en el Sur predomina, aunque menos pronunciada la componente del Sur señalando el efecto de la isla de calor y el aire frío de las montañas: durante el día no se muestra en las 4 estaciones una preferencia del viento superficial a soplar en cierta dirección. En parte esto es explicable ya que una vez que desaparece la inversión prevalecen los vientos de gradiente regionales que en esta época tienen una componente del Oeste (a 2-3,000 m) que al modificarse por la topografía resultan en vientos con componente del Norte, durante el día, como lo acusan la estación 2 y 5 aunque con grandes variaciones.

VARIACION TEMPORAL DEL SO₂

En la Fig. 3 se muestran ejemplos de la variación diurna del SO₂ para dos días de los meses de enero y julio en dos estaciones del centro de la ciudad.

En enero el máximo de concentración del SO₂ ocurre entre las 9 y las 11 horas, presentándose un máximo secundario entre las 19 y las 21 horas. El máximo de la mañana se observa una o dos horas más temprano en la estación de lluvias que en las secas (fig. 3) debido quizá a que en el verano las inversiones son menos intensas y el asoleamiento se inicia a una hora más temprana.

Esta variación diurna del SO₂ es semejante a la observada en otras ciudades, tanto de las latitudes templadas (Schmidt, 1970) como en los subtrópicos (Tiao *et al.*, 1975). Las condiciones de estabilidad determinan principalmente estos cambios. El principal pico de SO₂ se presenta a las horas en que prevaleciendo todavía una capa de aire estable ocurre un aumento de emisiones vehiculares al iniciarse el período de trabajo. Al incrementarse la capa de mezcla decrecen bruscamente las concentraciones de SO₂ después de las 8-9 de la mañana en la estación lluviosa y después de las 10-11 a.m. en los meses fríos.

El segundo máximo alrededor de las 8 p.m. se presenta con el establecimiento de la capa estable al caer la tarde al mismo tiempo que ocurre el pico de tránsito vespertino en la ciudad.

Como se ha explicado en un trabajo anterior (Jáuregui *et al.*, 1979), la reducción considerable (hasta un 50%) de los máximos de SO₂ en ju-

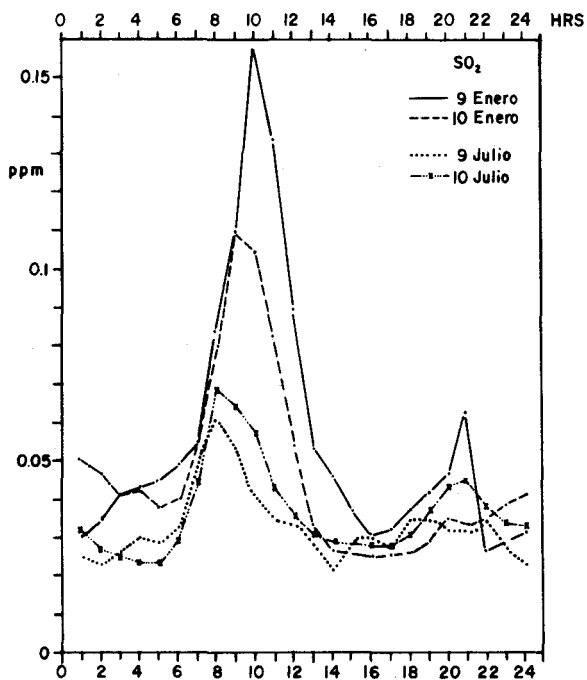


FIG. 3. CONCENTRACION MEDIA HORARIA DE SO₂ EN LAS ESTACIONES 9 Y 10 EN EL CENTRO DE LA CIUDAD DE MEXICO PARA LOS MESES DE ENERO Y JULIO DE 1976.

lio, se debe en parte al efecto de lavado de las gotas de nube y de la lluvia (washout y rainout). Además, la mayor inestabilidad convectiva propia de la corriente húmeda de los alisios ayuda a una dilución más energética (Manes *et al.*, 1978).

En la Fig. 4 se muestra la relación entre los niveles de SO_2 y la intensidad del viento en las estaciones 2, 3, 4 y 5 (Fig. 1). Como era de esperarse el viento se intensifica una vez que desaparece la inversión superficial. Los valores mínimos de SO_2 ocurren cuando el viento ha alcanzado su máximo. Un caso particular es la estación 3 en donde se observan concentraciones de 0.1 ppm a las horas en que todavía no ha desaparecido la inversión. En algunos días de los meses fríos se registran aquí valores arriba de 0.2 ppm que se explican por la cercanía con las fuentes de emisión (ver Fig. 9c).

En las estaciones del área central de la ciudad (estaciones 9 y 10) se observan valores horarios de SO_2 mayores de 0.1 ppm que en algunos países como Japón se acepta como norma de calidad del aire (Shikata y Sakura, 1978). Quizá para el caso de ciudades que como la de México se encuentra a gran altitud, la norma debía ser más restringida si se toma en cuenta que la presión parcial del oxígeno es más reducida.

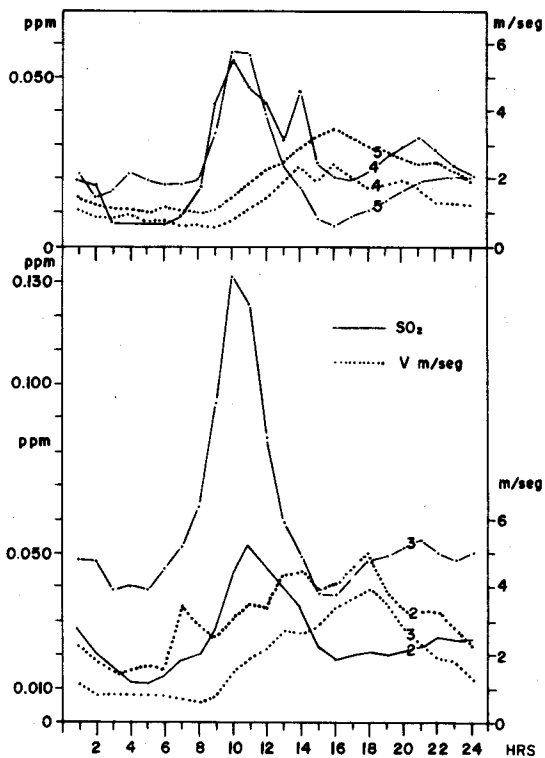


FIG. 4. VARIACION MEDIA DIURNA DE LA CONCENTRACION DE SO₂ Y DEL VIENTO (m/s) PARA 4 ESTACIONES EN LA CIUDAD DE MEXICO EN ENERO DE 1976.

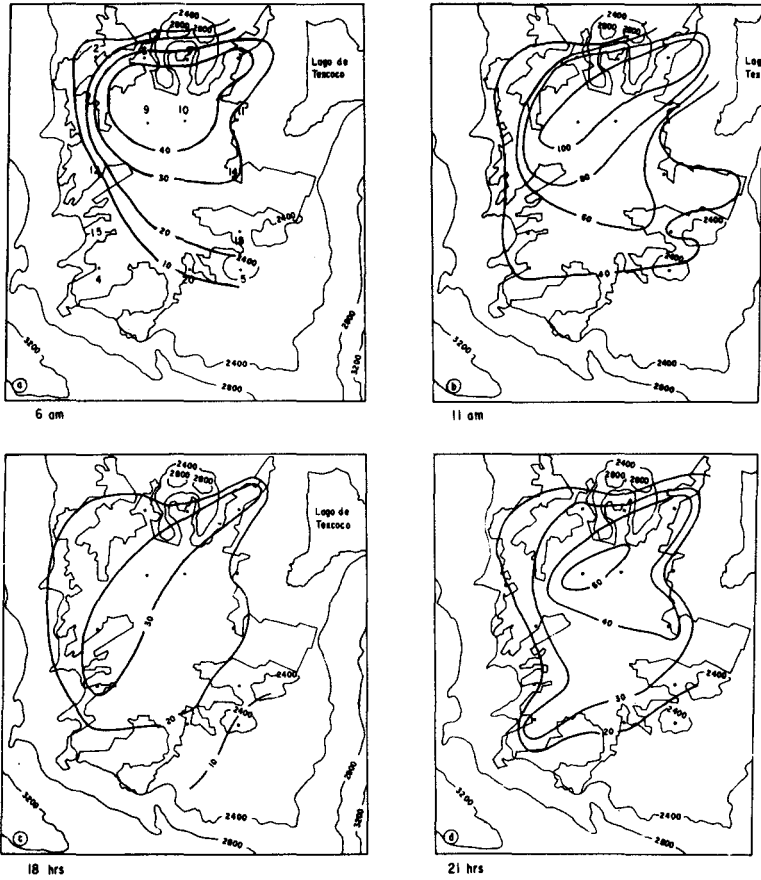


Fig. 5: Distribución media en enero del SO₂ a las 6 (a), 11 (b), 18 (c) y 21 (d) horas en enero de 1976.

ESTACION	96	48	24	12	8	3, 5 - 4	2 hs
2	6.2	4.2	7.5	10.4	1.5	1.3	0
3	4.6	2.3	7.8	7.4	3.3	0.5	0
4	1.8	2.1	10.5	10.9	1.5	0.5	0.9
5	3.5	2.0	8.7	9.8	3.9	0.4	0
6	6.2	3.5	11.4	8.8	3.0	0.5	0
7	2.2	0.8	14.98	13.4	5.6	2.3	0
9	3.4	2.0	10.1	6.8	3.1	0.7	0.7
10	6.0	3.5	12.6	8.3	4.1	0.7	0
11	3.7	4.0	4.2	4.3	2.2	0.9	0
12	2.3	1.9	18.9	5.6	3.3	0.6	0
14	8.0	4.3	7.9	5.8	1.6	0.6	0.5
15	2.2	2.1	13.5	3.3	2.1	1.5	0
18	4.5	3.6	6.6	5.5	1.7	1.1	0
20	5.9	4.3	7.8	10.4	1.5	1.2	0

Tabla 1. Porcentaje de la variancia explicada de algunos periodos seleccionados para las series horarias de concentración de SO_2 en el mes de enero de 1976.

Periodicidad de las concentraciones del SO₂

La periodicidad doble diurna del SO₂ que se observa en promedio, puede examinarse a la luz del análisis periódico.

En la Fig. 5 se muestra la distribución media del SO₂ en enero de 1976 para 4 horas. En los 4 casos los valores máximos se observan en dos áreas centro y norte de la ciudad. El desplazamiento de las isolíneas hacia el Sur sugiere un movimiento del gas contaminante de NE a SW en el período de las 11 a las 21 hs.

El análisis de variancia que emplearemos es el propuesto por Blackman y Tukey (1958) y se utilizará la prueba de significancia de Mitchell (1966).

El método consiste en descomponer las partes de que está formada la variancia total de una serie de tiempo. Los períodos posibles están comprometidos entre la tendencia lineal y las longitudes dobles de un período entre dos observaciones consecutivas.

Brevemente, el método puede describirse:

Si x_i es el término de N observaciones de una serie temporal, los primeros mN coeficientes de autocovariancia se pueden expresar:

$$c_r = 1/(N-r) \sum_{i=1}^{N-r} (x_i - \bar{x})(x_{i+r} - \bar{x}) \quad r=1 \dots m \quad (1)$$

donde \bar{x} es el valor medio de la serie de términos x_i

Los espectros se determinan por medio de las ecuaciones:

$$s_0 = (1/2)m(c_0 + c_m) + (1/m) \sum_{r=1}^{m-1} c_r \quad (2)$$

$$s_k = c_0/m + (2/m) \sum_{r=1}^{m-1} c_r \cos(\pi k r/m + 1/m c_m (-1)^k) \quad (3)$$

$$s_m = 1 + 2m(c_0 + (-1)^m c_m) + (1/m) \sum_{r=1}^{m-1} (-1)^r c_r \quad (4)$$

$$k = 1, \dots, m-1$$

El espectro s_0 corresponde a la tendencia lineal, mientras el m -ésimo corresponde a la longitud del período más corto.

Todos los espectros se suavizan empleando el método desarrollado por Hammig (Mitchell, 1966).

$$ss_0 = 1/2 (s_0 + s_1) \quad (5)$$

$$ss_k = 1/4 (s_{k-1} + s_k + s_k + 1) \quad (6)$$

$$ss_m = 1/2 (s_{m-1} + s_m) \quad (7)$$

El método descrito, llamado análisis de variancia, representa una extensión del análisis armónico (Panofsky y Brier, 1958).

Cada una de las armónicas explica la parte ss_k de la variancia total de la serie temporal. En la tabla 1 aparecen estos porcentajes de la variancia total para las series horarias de valores de SO_2 del mes de enero de 1976 y otros períodos seleccionados. El valor máximo M se iguala siempre a un décimo de la serie total N (Taubenheim, 1968).

En todas las series investigadas se encuentran persistencias markovianas simples, es decir que entre los primeros coeficientes de autocorrelación y los subsecuentes existe la relación:

$$r_2 \cong r_1^2 \quad \text{y} \quad r_3 \cong r_1^3$$

La probabilidad de que las variancias parciales de los diversos períodos no se deban al azar se puede determinar cuando la igualdad entre los espectros ss_k ($k = 1, m$) y el continuo del "ruido rojo" muestra desviaciones significativas:

$$rr_k = \bar{ss} \frac{1-r_1^2}{1_m + 1 + r_1^2 - 2r_1 \cos(\pi k/m)} \quad (8)$$

$$\bar{ss} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^{m+1} s_{k-1} \quad (9)$$

En la fig. 6a se muestra la distribución espacial de la parte de la variancia total del SO₂ para un período de 24 hr. La distribución NE-SW de la fig. 5, aparece de nuevo aquí en forma menos marcada. Se advierte que en el área perimetral el período de 24 hs. es menos acentuado.

Se destaca además la variancia más alta en la vecindad del Bosque de Chapultepec y en la estación 7 al pie de la Serranía de Guadalupe. En la fig. 6a se ha trazado la isoterma -2°C según Jáuregui (1973b) que corresponde a enero.

Durante la noche desciende el aire frío de la Serranía de las Cruces hacia el Bosque de Chapultepec y en el borde norte de la ciudad baja el aire frío de la Serranía de Guadalupe (fig. 6a). En estas áreas es donde la periodicidad de 24 hs. es más acentuada; lo que significa sin embargo que también hay otros períodos de importancia secundaria. El máximo secundario de las 21 hs. sólo aparece muy débilmente en algunas estaciones y en otras no existe. Quizá esto se deba a que el máximo tráfico nocturno decrece hacia la periferia, donde la llegada del aire rural diluye los contaminantes.

En la fig. 6b aparece la parte porcentual de la variancia total del SO₂ que puede explicarse en la periodicidad de 12 hs.

Los valores máximos se observan en el Norte y hacia el Sur de la ciudad. Hacia los bordes esta periodicidad es muy débil, como en el caso de la correspondiente a 24 horas. Es posible que esto se deba a que la isla de calor se divide en dos partes, separada (o estrangulada) por una penetración de aire frío a la altura del bosque de Chapultepec (Jáuregui, 1973c) y en dirección al Cerro de la Estrella.

Al calcular la variabilidad de la periodicidad de 24 horas:

$$v = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (\text{en } \%) \quad (10)$$

puede apreciarse (fig. 6c) que la variabilidad mayor diurna del SO₂ promedio del mes se distribuye en forma semejante a como se reparte la periodicidad de 24 horas.

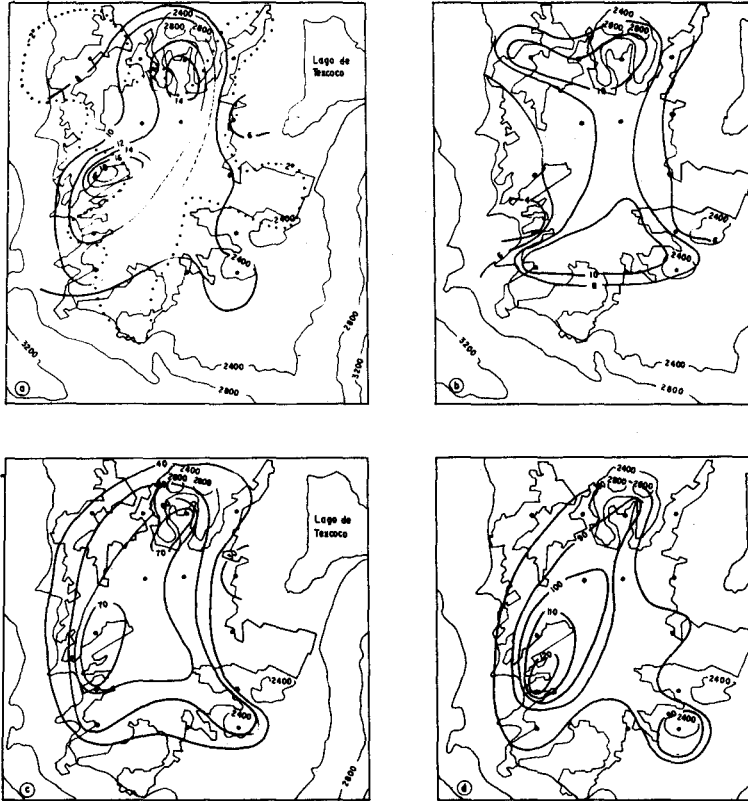


Fig. 6 Distribución del porcentaje de la variancia explicada para períodos de 24 hrs (a) y 12 horas (b) así como la variabilidad de la oscilación diurna (c) y de los 744 valores horarios (d) del mes de enero 1976

La distribución de la variabilidad del SO_2 cambia cuando se toman los 744 valores horarios de la serie de enero y el máximo se observa en el sector SW de la ciudad (fig. 6d) lo que no es fácil de explicarse.

Variación interdiurna de la concentración del SO_2

En la fig. 7 aparecen los valores medios de cada día del mes de enero de 1976 para algunas estaciones, expresados en porciento del promedio para todo el mes. Se aprecia el decrecimiento de los niveles en los fines de semana, el cual es estadísticamente significativo según la prueba t.

Después del día 18 los máximos a media semana se acusan claramente, en cambio los anteriores a esa fecha no se observaron debido al paso de frentes polares por el Valle, los días 7-8 y 16-17 de enero. En estas condiciones la advección del aire polar transporta y diluye rápidamente las emanaciones de la ciudad.

En los días 29-30 de enero una baja presión al oeste del país (fig. 8d) determinó vientos débiles del Sur en el Valle, reflejándose en una elevación de las concentraciones.

En la fig. 9 se muestra la distribución de SO_2 en porciento del promedio mensual para el día 17 de enero de 1976 a las 10 horas, así como la intensidad y dirección del viento. Las concentraciones se mantienen por debajo de la media y los máximos valores se han desplazado hacia el Sur impulsadas por el viento del Norte (fig. 9a), y la forma que adopta el área de máximo está en concordancia con la distribución de las fuentes principales de SO_2 que se ubican al W, E y S.

En el caso del flujo del Sur (Fig. 9b) la configuración de las concentraciones es inversa a la anterior. Aunque con vientos más débiles que los Nortes, los valores de SO_2 al sotavento de la ciudad se elevan aún por arriba del promedio mensual para las 10 hs. lo que se explica por la distribución de las fuentes.

En resumen se puede decir que cuando prevalecen gradientes regionales débiles, la circulación local determina la distribución del SO_2 .

La llegada de aire polar al Valle tiene un ritmo aproximado de uno por semana (Hill, 1969; Jáuregui, 1972; Klaus, 1975) y la turbulencia asociada a estos frentes abate drásticamente los niveles de contaminación.

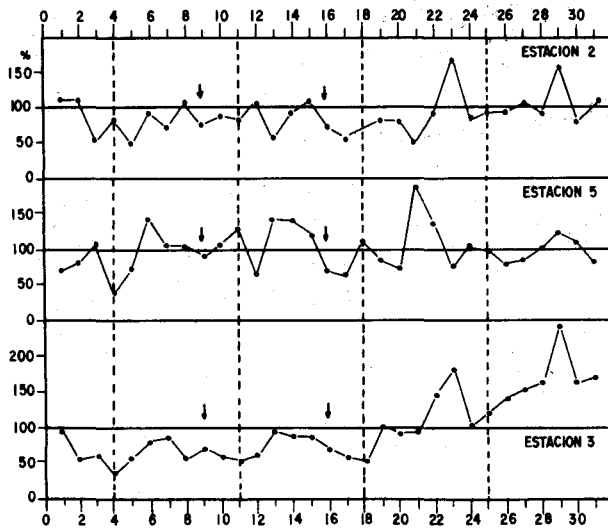


Fig : 7: Valores promedio diarios de la concentración de SO₂ en % del valor promedio para todo el período

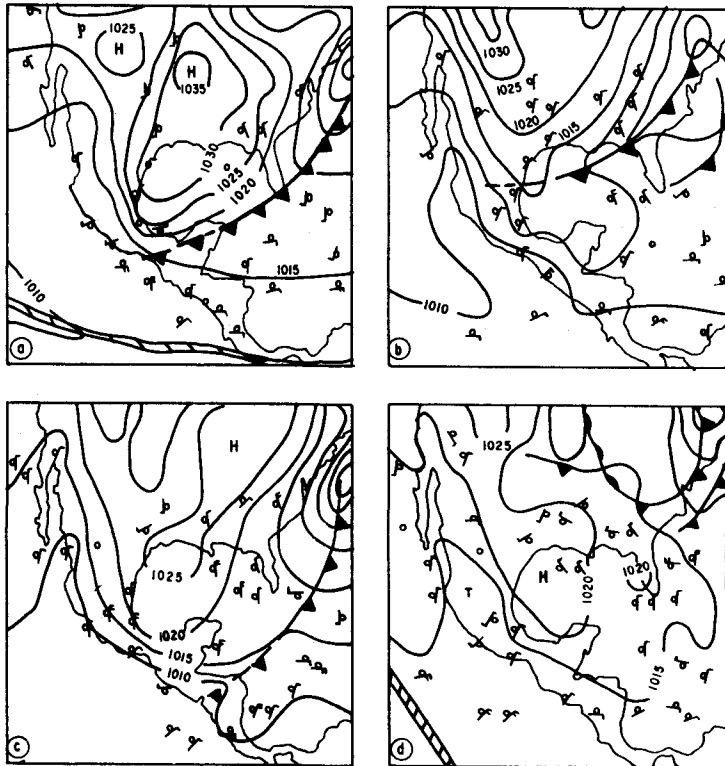


Fig. 8: Situación sinóptica para los días 16, 1, 76 (a) y el 17, 1, 76 (c) así como para el 8, 1, 76 (b) y el 29, 1, 76 (d) para las 0:0 hrs GMT.

En la Fig. 9c se muestra el porciento de la variancia del período de unos 6 a 7 días para enero de 1976. La periodicidad de las perturbaciones sinópticas de invierno se acusa más en la porción NE de la ciudad y, pierde importancia hacia el Sur.

ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES DE LA DISTRIBUCIÓN DEL SO_2

Para poder pronosticar los niveles de contaminación en las diversas zonas de la ciudad, es de gran utilidad conocer las diversas distribuciones espaciales del SO_2 en relación con el tiempo. Con datos horarios del mes de enero de 1976, tanto del SO_2 como de la dirección y fuerza del viento se obtuvieron 744 distribuciones. Aunque estas distribuciones fueron muy diversas, se pudo llegar a algunos tipos de distribución característicos.

Para hacer una estimación de las variaciones de las distribuciones espaciales, de series temporales, se utiliza el método propuesto por Prinz y Stratmann (1968).

En el campo de la meteorología Kutzbach (1970) y de la geografía (Skaggs, 1975), son ya numerosas las aplicaciones de este método. Enseguida se hará una breve exposición de los aspectos matemáticos.

Para el mes de enero de 1976, se contó con 31 x 24 valores horarios de SO_2 para 14 estaciones de la ciudad. En aquellos días en que faltaron los datos, sobre todo entre el día 20 y 29, se utilizaron los promedios.

La matriz quedó formada por las 14 estaciones con 744 datos de SO_2 . Cada columna representa la serie de datos horarios de SO_2 de enero de 1976, para cada una de las 14 estaciones. El siguiente paso es la normalización y estandarización por medio de la relación:

$$Z_{ji} = \frac{x_{ji} - \bar{x}_j}{\sigma_j} \quad (1)$$

donde

\bar{x}_j — es el promedio de las j estaciones; σ_j — desvío tipo de las estaciones ($j = 1 \dots 14$; $i = 1 \dots 744$).

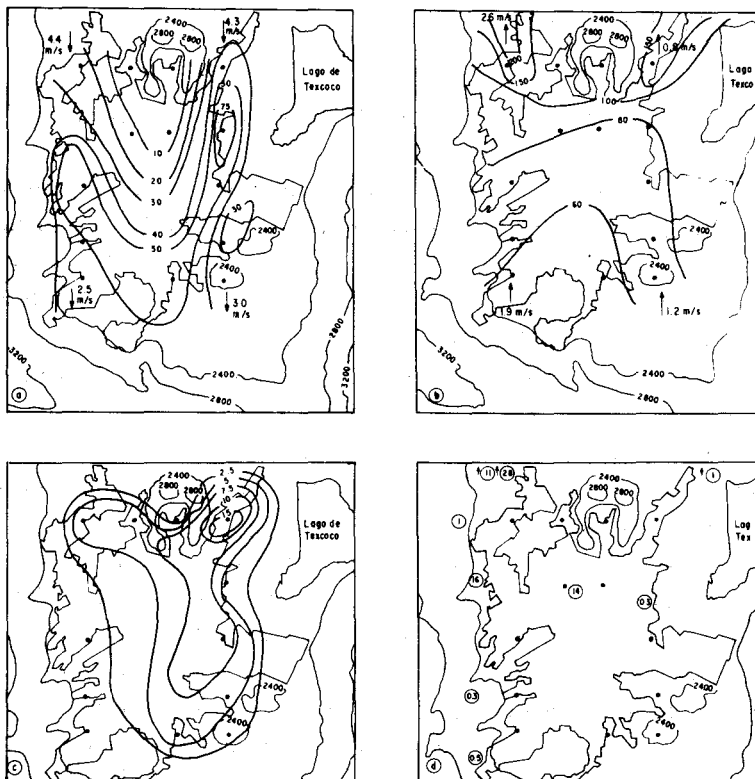


Fig. 9. a) Dirección, intensidad del viento y distribución del SO_2 en % de los valores horarios mensuales para el 17, 1, 76 a las 10:00 hrs
 b) Igual que en 9a, para el 29, 1, 76, 10:00 hrs
 c) Porción porcentual de la variancia total, para el período de 6-7 días
 d) Ubicación de las principales fuentes fijas de SO_2 . Los números en círculo son el % del total.

La multiplicación de la matriz transformada al ser traspuesta, resulta la matriz cuadrática A de 14 x 14:

$$Y Y^T = A \quad (2)$$

Los elementos diagonales de A representan las sumas cuadráticas y transformadas de los valores horarios de SO₂, mientras que los elementos no diagonales son las sumas de los productos cruzados entre todos los valores horarios de SO₂.

De acuerdo con el modelo del análisis de componentes principales, se determinan los eigenvectores que en forma matricial se expresan:

$$AX = \lambda_i X \quad (3)$$

los eigenvalores λ_i son las componentes de los vectores X que representan a los eigenvectores que satisfacen el sistema de igualdades (3) y que aclaran o explican la mayor porción de la variancia total de Y. Las soluciones existen cuando:

$$(A - \lambda_i I) X = 0 \quad \text{ó} \quad (4)$$

$$(A - \lambda_i I) = 0 \quad \text{siendo } I \text{ el eigenvector.} \quad (5)$$

Los eigenvectores se explican como si fueran ejes de un nuevo sistema coordenado en donde se localizan los datos originales. En los espacios de 14 dimensiones pueden despejarse los valores transformados de SO₂, según los ejes de los eigenvectores. Las muestras espaciales con características temporales semejantes, se encuentran agrupadas en este sistema coordenado, de modo que guardan una variancia temporal semejante.

Como consecuencia de esta condición, se determina, por medio del origen y el punto en el espacio de N dimensiones, el primer eigenvector que explica la máxima variancia. El segundo eigenvector hace máxima la variancia restante; el tercero maximiza aún la que queda del segundo y así sucesivamente. En este sistema coordenado puede interpretarse con cada eigenvector una parte de la variancia de la distribución espacial de la muestra.

La relación entre los datos transformados y los eigenvectores, se expresa por:

$$Y = XM \quad (6)$$

X es la matriz de eigenvectores, M es la matriz 14 X 744 de los coeficientes de los eigenvectores, que dan una medida del grado de explicación entre los eigenvectores y los datos transformados.

Los coeficientes de los eigenvectores representan por lo tanto las correspondientes series horarias.

El valor de los coeficientes es según la expresión (6), una medida del grado de explicación de la muestra espacial de las componentes de los eigenvectores en relación a los datos horarios transformados de SO₂.

Si los valores horarios de los coeficientes son grandes y positivos, en esa medida será buena la correspondencia entre las componentes espaciales de los eigenvectores y la muestra espacial de los valores transformados de la serie original de datos observados de SO₂. Por otra parte, si los valores horarios de los coeficientes de los eigenvectores resultan altos y negativos, entonces será inversa la distribución de la muestra de los componentes de los eigenvectores para reproducir los datos de salida. Para cada período de tiempo deseado, se pueden obtener todos los eigenvectores y la suma de los valores transformados de SO₂, por medio de la multiplicación de los componentes de los eigenvectores de todos los eigenvectores con sus correspondientes coeficientes.

Rotando el sistema de coordenadas de los eigenvectores, según la "condición de máxima variancia", se puede lograr que aquellas estaciones que muestran una alta correlación con el eigenvector tienen una mínima explicación de la variancia del resto de los eigenvectores. Esto significa que las componentes de este eigenvector muestran valores muy altos o muy bajos. En esta forma se facilita considerablemente la interpretación de los eigenvectores.

Con las 14 series temporales de valores horarios de concentración de SO₂, y siguiendo el método descrito de los eigenvectores ortogonales, se procederá a explicar las porciones máximas de la variancia total.

En la tabla 2 aparecen los eigenvalores y la porción explicada de la variancia. Prevalece el primer eigenvector con un 37% de la variancia.

Entre los eigenvectores sexto y séptimo se elevan las variancias explicadas a 1%. Teóricamente se puede considerar (Craddock y Flood, 1969) que los eigenvectores 7 al 14 muestran variancias de fondo.

En la fig. 10 se muestra la distribución de los eigenvectores 1 y 2. En ambos casos aparece un máximo de variancia en el SW de la ciudad. Se hizo una rotación de máxima variación para acumular al máximo las componentes del eigenvector para cada estación.

En la fig. 11 se muestra el resultado de la rotación del primer eigenvector.

En la fig. 12a aparecen los correspondientes eigencoeficientes. Después de la rotación, este eigenvector explica el 23.6% de la variancia total de los datos.

Se aprecia en la fig. 11a que las componentes de los eigenvectores disminuyen hacia el Sur y aumentan (consecuentemente) hacia el Norte.

La serie temporal de los coeficientes de los eigenvectores acusa una variación periódica. Los valores altos negativos aparecen regularmente (sólo se muestran los primeros 15 días de enero, ya que en la segunda faltan datos) entre las 9 y las 11 a.m., mientras que por la noche prevalecen los valores negativos pequeños.

De acuerdo con la ecuación (6), cuando los valores de los coeficientes de los eigenvectores son altos y negativos hay una relación inversa máxima de similitud con los datos transformados. Esto significa que los valores positivos mayores de SO_2 se observan entre las 9 y las 11 hs. en las zonas norte y centro de la ciudad, mientras que por la noche se observan ahí precisamente los valores más bajos. Ya que esta distribución explica un 23.6% de la variancia total, había de ser de utilidad para el pronóstico de distribución del SO_2 en la ciudad de México para el mes de enero y en general para los meses de la estación seca. La pregunta queda abierta de porqué este ciclo diurno en ocasiones no exhibe el segundo máximo a las 18 horas (el 12.1.76; o el 14 y 15 de enero de 1976).

En la fig. 11b se muestra para el segundo eigenvector una distribución diferente. La variancia máxima ocurre en el suroeste de la ciudad mientras que hacia el E los valores decrecen. Los coeficientes de los eigenvectores muestran valores prevalecientes cercanos a cero en 7 de los 15 días representados y valores extremos positivos de los coeficientes (los

Eigenvector	Eigenvalor	Variancia explicada (en %)	Diferencia entre las variancias	Variancia acumulada
I	5.19	37.0	-	37.0
II	1.45	10.3	26.7	47.4
III	1.20	8.5	1.8	56.0
IV	0.91	6.5	2.0	62.5
V	0.85	6.1	0.4	68.6
VI	0.78	5.6	0.5	74.2
VII	0.65	4.6	1.0	78.9
VIII	0.57	4.1	0.5	83.0
IX	0.54	3.8	0.3	86.9
X	0.49	3.5	0.3	90.4

Tabla 2. Porción explicada de la variancia de los eigenectores

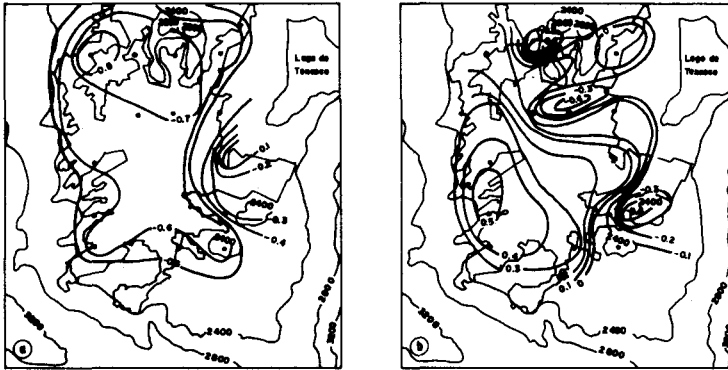


Fig 10 : Distribución espacial de los componentes giradas de los eigen vectores I (a) y II (b)

días 5, 7, 8, 13, 14 y 15 de enero de 1976). Los valores máximos de SO_2 aparecen en las horas del mediodía (11 a 13 hs.) ya que no hay valores negativos altos de los coeficientes, la distribución inversa es casi insignificante. Al comparar las figuras 11a y 11b se puede apreciar que la distribución espacial del segundo eigenvector tiene bastante significación cuando la distribución del primer eigenvector pierde importancia (por ej. los días 7, 8, 13, 14 de enero). Con un 15.2% de la variancia, esta distribución puede también ser de utilidad para el pronóstico. El tercer eigenvector explica todavía un 11.9% de la variancia total. La distribución, con respecto a las anteriores, muestra una estructura poco clara. En particular cuatro estaciones (en el Norte y en el Sur) son responsables de gran parte de la variancia total. Es posible que gran parte de esta variancia se deba a factores regionales. La serie temporal de los coeficientes de los eigenectores muestra que, después del 7 de enero aparecen con cierta regularidad los valores máximos de SO_2 a las 9-10 hs. en el noreste y sureste de la ciudad. Como muestran las variaciones de los coeficientes del 6 al 14, aparece aquí también una periodicidad diurna bien marcada, que desde luego aparecen con alguna persistencia como por ejemplo en los días 1, 2 y 15 de enero.

La distribución del cuarto eigenvector explica todavía el 7.8% de la variancia total y exhibe una estructura celular bien acentuada (Fig. 11d). Los valores mayores aparecen en el SE de la ciudad y muestran una conexión con la zona del NW. La distribución prevalece por la noche y al amanecer en sólo 4 de los primeros 15 días. Los coeficientes elevados negativos muestran que la distribución inversa representada, se puede reconocer por los valores elevados de SO_2 en el sur y sureste de la ciudad, para estos períodos del día. Los coeficientes positivos permanecen relativamente bajos y caracterizan la distribución inversa con valores pequeños de SO_2 en el sureste y noreste de la ciudad.

En la misma forma que los anteriores, el quinto y sexto eigenectores explican solamente el 7.5% de la variancia total (fig. 11). También aquí se muestra una ordenación celular de la distribución que refleja quizá características regionales. La porción con una variancia mayor se encuentra hacia el este de la ciudad. De preferencia, los valores máximos de SO_2 del quinto eigenvector se observan en la tarde y por la noche, y en el caso del sexto eigenvector, estos valores máximos ocurren casi sin

excepción por la noche.

En conjunto, los eigenvectores del 1 al 6 explican un 74.6% de la variancia conjunta de las series temporales de las variaciones del SO_2 .

Al comparar las distribuciones de los eigenvectores con los valores medios del SO_2 (fig. 5) puede apreciarse que hay poca semejanza. Esto significa que la distribución promedio del SO_2 es el resultado de diversos ordenamientos del contaminante y que éstos explican, por medio de este análisis de componentes, hasta casi los 3/4 de la variancia total. Enseguida se intentará por medio de análisis de correlación con algunos parámetros meteorológicos aclarar las distribuciones obtenidas.

RELACION ENTRE LAS DISTRIBUCIONES DE LOS EIGENVECTORES Y ALGUNOS PARAMETROS METEOROLOGICOS

Las series de los coeficientes muestran a simple vista una periodicidad (fig. 12). Se hizo un análisis de espectro cuyo resultado aparece en la fig. 13. La prueba de significancia (al 5%) acusó una persistencia, que se advierte en la fig. 13.

Las variancias máximas de los coeficientes de los primeros eigenvectores se explican con un período de 24 horas. Altamente significantes en el primer eigenvector son los períodos de 11.5 y 7.8 horas. Lo mismo puede decirse para el segundo eigenvector que muestra una periodicidad semejante (la de 11 horas) (fig. 13). En el tercer eigenvector aparece sólo un período de 12 horas, mientras que en los cuarto y quinto eigenvectores aparecen con poca claridad los períodos de 12 y 25 horas. En el caso del sexto eigenvector (fig. 13), muestra una porción alta de la variancia para períodos de 96 y 48 horas que no son significativos. Se hizo un análisis de espectro para las series de SO_2 (tabla 2) y la velocidad del viento (componentes zonal y meridional). En la tabla 3 aparecen los resultados para la velocidad del viento. Aparece claramente un período de 24 horas que es significativo para todas las estaciones. Con este resultado se comprueba cuantitativamente el marcado efecto que en las distribuciones de SO_2 tienen los factores locales en el valle de México. Para los períodos de 12 y 8 horas, el análisis de espectro de la velocidad del viento muestra muy poca de la variancia explicada. Sin embargo, el período de 8 horas que es significativo en el primer eigen-

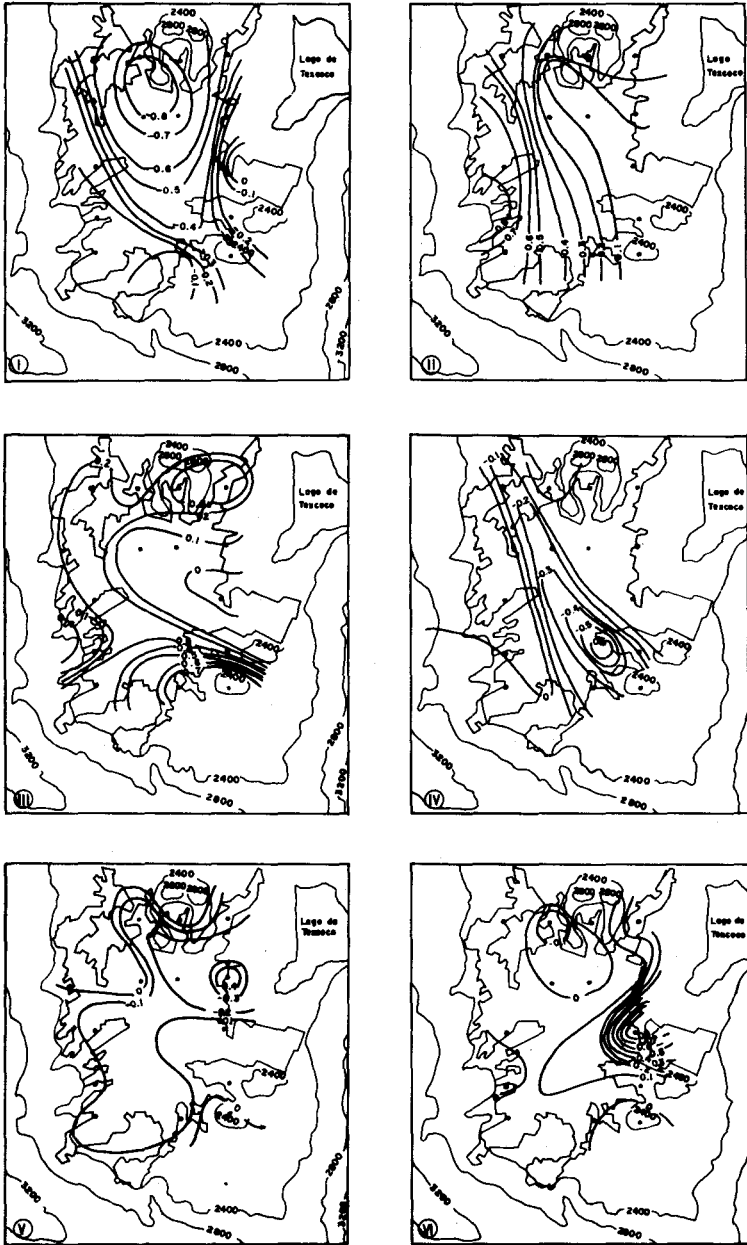


Fig. II: Distribución espacial de los componentes giradas de los eigen-
vectores I - VI

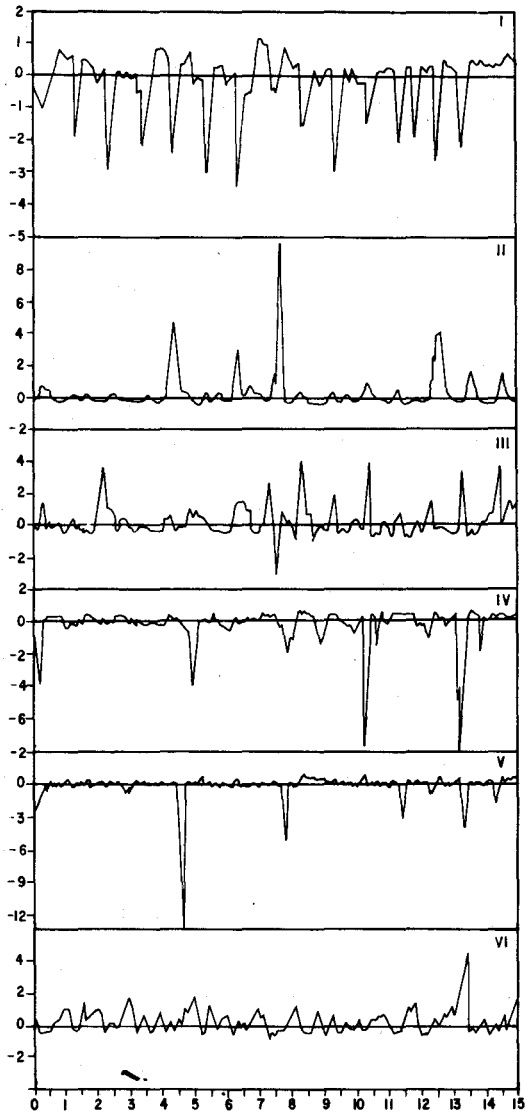


Fig. 12: Serie temporal de los coeficientes de los eigen-
vectores I - VI

vector, está relacionado también con el correspondiente para la velocidad del viento.

Puesto que tanto la concentración de SO_2 como la intensidad del viento muestran una marcada periodicidad, es de esperarse que el paralelismo lineal se refleje en coeficientes de correlación alta. En la tabla 4 aparecen los coeficientes de correlación lineal entre las concentraciones horarias de SO_2 y la velocidad del viento. Ya que ambas series están autocorrelacionadas, se reduce el número de grados de libertad de la prueba de significancia (Taubenheim, 1969). En este caso cada correlación está basada en alrededor de 744 valores. Una reducción de los grados de libertad cambia por lo tanto el nivel de significación sólo en forma insignificante. Todos los coeficientes de significancia mayores de 0.1 son en esta prueba significantes. La relación entre la intensidad del viento y la concentración de SO_2 no aparece muy clara para las diversas categorías de intensidad del viento. Puede apreciarse de la tabla 4 que hay una dependencia de los coeficientes positivos o negativos con las clases de intensidad del viento. En particular los coeficientes de correlación de la estación 3 suben cuando es más débil el viento, pero bajan con clases de intensidad alta del viento. Si recordamos que las fuentes más importantes de emisión de SO_2 se encuentran en el norte de la estación 3, podremos explicarnos estos resultados (fig. 9d). En la misma forma podría explicarse porqué con velocidades altas (mayores de 4.8 m/s) en la estación 2 resulta con un coeficiente positivo de correlación que no es significativo. Los vientos relativamente fuertes (de 3.2-4.8 m/s) traen consigo en la estación 2, una reducción de los niveles de SO_2 .

Las correlaciones lineales aumentan considerablemente al desplazar las series. En las estaciones 2, 3 y 4 se obtienen coeficientes máximos de correlación con corrimientos de 3 a 5 horas y en la estación 5, con un adelanto de 2 horas. Excepto esta estación 5, los coeficientes de correlación son todos positivos, lo que significa que hay en general un paralelismo entre las dos series como resultado del corrimiento (ver fig. 4). Este resultado ilustra además la dependencia de los niveles de SO_2 con la circulación local.

La regresión lineal entre la dirección del viento (componentes meridional y zonal) y los niveles de SO_2 da resultados satisfactorios sólo para la estación 2. Los coeficientes de correlación con la componente zo-

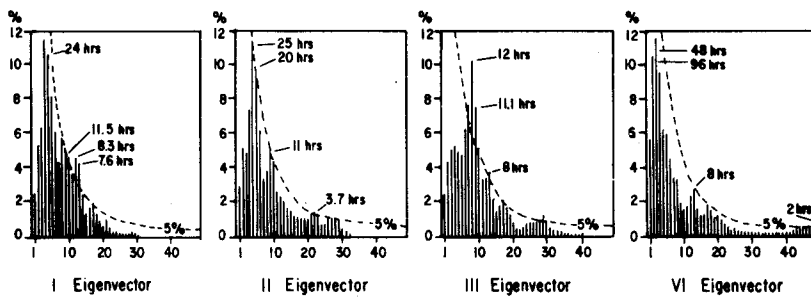


Fig. 13: Distribución espectral de los períodos en (%) para las series temporales de los coeficientes de los eigenvectores.

Tabla 3. Porcentaje de la variancia explicada para algunos periodos para las series horarias de la velocidad del viento en el mes de enero de 1976.

Estación	86	48	24	12	8	3,5 - 4,5	2 hs.
2	4.0	2.7	27.1	1.01	1.3	0.7	-
3	3.8	2.7	31.4	1.5	0.7	-	-
4	3.9	2.9	24.4	2.6	1.2	0.5	-
5	3.4	4.2	28.8	1.9	1.2	-	-

nal (Este-Oeste), meridional (Norte-Sur), fueron 0.307 y 0.245 respectivamente. Ambos son significativos. Para el resto de las estaciones los coeficientes de correlación se mantienen en general por debajo del 5% de significancia.

En la tabla 5 aparecen los resultados del análisis de regresión entre los coeficientes de los eigenvectores y la dirección e intensidad del viento. Aun cuando a veces es muy alta la correlación entre la velocidad del viento y los coeficientes de los eigenvectores, esto se debe a que es muy efectiva la semejanza de la variación diurna de ambos parámetros, especialmente para los eigenvectores I-III. Una función adecuada para fines de pronóstico debería considerar además de la tendencia, las periodicidades de 24, 12 y 8 horas.

En la tabla 6 se encuentran los resultados del cálculo de los coeficientes de una regresión múltiple.

La regresión múltiple óptima resultó ser una cuyo programa en Fortran IV nos fue proporcionado gentilmente por el señor Pyrowodakis, del Instituto de Ciencias del Comercio (Universidad de Bonn, Alemania Federal):

$$Y_t = a_0 + a_1 x_t + a_2 Y_{t-1} \quad (1)$$

donde

Y_t es la concentración de SO_2 en la hora t ó una hora antes ($t - 1$), mientras que x_t , de la tabla 6, es la velocidad del viento en la hora t .

La igualdad 1 muestra que los valores de una hora dada de SO_2 dependen en gran medida de los respectivos de la hora anterior. Los coeficientes de a_1 son sin excepción positivos y muestran que un aumento de la velocidad del viento se refleja en un ligero aumento en promedio de las concentraciones de SO_2 , cuando se usa el dato de SO_2 de la hora anterior.

En la ecuación 1 también está expresada la periodicidad. Otra posibilidad de expresar la periodicidad es por medio de un análisis armónico

especial (Wetzel, 1970). Las siguientes expresiones dan buenos resultados:

$$\begin{aligned}
 Y_t = a_0 + a_1 x_t + a_2 \text{ sen } (2 \text{ Ht}/24) + & \quad (2) \\
 + a_3 \text{ cos } (2 \text{ Ht}/24) + a_4 \text{ sen } (4 \text{ Ht}/24) & \\
 + a_5 \text{ cos } (4 \text{ Ht}/24) + a_6 \text{ sen } (6 \text{ Ht}/24) & \\
 + a_7 \text{ cos } (6 \text{ Ht}/24) &
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Y_t = a_0 + a_1 x_t + a_2 Y_{t-1} + a_3 \text{ sen } (2 \text{ Ht}/24) + & \quad (3) \\
 + a_4 \text{ cos } (2 \text{ Ht}/24) + a_5 \text{ sen } (2 \text{ Ht}/24) & \\
 + a_6 \text{ cos } (2 \text{ Ht}/24) + a_7 \text{ sen } (2 \text{ Ht}/24) + & \\
 + a_8 \text{ cos } (2 \text{ Ht}/24) &
 \end{aligned}$$

En la tabla 7 aparecen los tipos 2 y 3 en la última columna. Aquí x se tomaría como la componente meridional o zonal. Las variables que contienen el seno y el coseno se determinan para el período de 24 hs. encontrado por el análisis espectral con $t = 1, \dots, 744$. En Y_t se sustituyen las series de los coeficientes de los eigenvectores. Los términos mayores de a_4 se desprecian de las ecuaciones (2) y (3) cuando no mejoran la correlación de los coeficientes. En la tabla 7 sólo aparecen los coeficientes de correlación predominantes y las correspondientes igualdades de regresión.

La velocidad del viento en la estación 3 destaca como significativa en el eigenvector 1 de la distribución de SO_2 . En efecto, el signo positivo del coeficiente a_1 produce, al aumentar la velocidad del viento (considerando la oscilación diurna), un aumento de los coeficientes de los eigenvectores, es decir, una reducción de las concentraciones de SO_2 .

Puesto que los coeficientes a_3 y a_4 representan los períodos de 24 horas, los coeficientes a_5 y a_6 los períodos de 12 horas y los a_7 y a_8 los correspondientes de 8 hs. ($2 \text{ Ht}/24$, $6 \text{ Ht}/24$), puede apreciarse que el período de 24 horas es el más marcado.

También en la tabla 6 puede verse que la velocidad del viento en la estación 2 es muy importante para explicar las fluctuaciones temporales del primer eigenvector.

Mientras que la componente zonal muestra solamente un coeficiente de regresión muy bajo (0.23) con los coeficientes del primer eigenvector.

Tabla 4, Coeficientes de correlación lineal y coeficientes de correlación cruzadas entre las concentraciones horarias de SO_2 y los valores correspondientes de la velocidad del viento (en clases) para enero de 1976.

	0- 1,6	1.6 - 3.2	3. 2 - 4.8	4.8 - 6.4	todos	con corrimiento	horas
Estación 2	-0.013	0.049	-0.269	0.113	-0.105	0.182	-3
Estación 3	0.192	-0.115	-0.118	-0.046	-0.111	0.220	-5
Estación 4	-0.069	-0.114	-0.518	-	-0.105	0.320	-3
Estación 5	-0.049	-0.108	-0.433	-	-0.163	-0.303	2

Corrimiento positivo en horas: SO_2 n horas antes que la velocidad del viento.

Corrimiento negativo en horas: SO_2 n horas después que la velocidad del viento.

	MERID.	INT.	MERID.	INT.	MERID.	INT.	MERID.	INT.
Estación	2	2	3	3	4	4	5	5
Ev. I	0.449 (-3)	0.49 (-5)	0.22 (3)	0.45 (-2)	-0.261 (-3)	0.45 (-3)	0.12 (0)	0.42 (-2)
II	0.151 (0)	0.30 (3)	0.11 (1)	0.36 (3)	-0.30 (1)	0.40 (3)	-0.23 (1)	0.36 (3)
III	0.15 (-4)	0.18 (3)	-	0.22 (5)	-	0.22 (3)	0.14 (0)	-0.16 (-3)
IV	0.155 (-1)	0.23 (2)	-0.160 (3)	0.211 (0)	-0.12 (-1)	0.20 (3)	0.14 (0)	0.22 (1)
V	-	0.14 (-3)	-	0.20 (3)	-	-	-	-
VI	0.12 (3)	0.17 (-3)	- (-)	0.20 (5)	0.13 (-3)	0.20 (2)	-0.14 (-1)	0.18 (-2)

Tabla 5. Coeficientes cruzados de correlación entre las series horarias de los coeficientes de los eigenvec-
tores 1 - VI y la dirección del viento - componente meridional de la intensidad del viento.

Los números en parentesis significan:

- n: Serie de los coeficientes de los eigenvectores en n horas contra la serie de la dirección
del viento retrasada.

+ n: Serie de los coeficientes de los eigenvectores en n horas contra la serie de la dirección
del viento adelantada.

* MERID. MERIDIONAL

* INT. INTENSIDAD

Tabla 6. Coeficientes de correlación lineal y múltiple, ^{así} como coeficientes de regresión y constantes que relacionan los valores horarios de concentración de SO₂ con la velocidad del viento.

La estructura normal de los residuos vale si la relación Durbin \neq Watson es mayor que 1.5 y menor de 2.3

SO ₂ /v	r	a ₀	a ₁	a ₂	Durbin - Watson
Estación 2	0.150	3.2	-0.0045	- -	1.2
Estación 2	0.748	0	0.0058	0.899	2.0
Estación 3	0.111	2.2	-0.0034	-	0.9
Estación 3	0.776	0	0.00268	0.37	1.7
Estación 4	0.105	1.3	-0.0047	-	0.9
Estación 4	0.758	0	0.00504	0.866	2.14
Estación 5	0.163	2.0	0.00969	-	0.8
Estación 5	0.721	0	0.0044	0.89	1.9

	Par	a	a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇	a ₈	D-W	Tipo
Fw I	V ₍₂₎	0.835	-5.2	0.26	-0.48	0.15	0.68	0.12	0.106	0.031	-0.11	1.9	3
	V ₍₃₎	0.865	-3.2	0.16	-0.57	0.37	0.52	-0.05	0.015	-0.145	-0.102	2.0	3
	M ₍₂₎	0.590	-2.9	0.148	-0.436	-0.069	-0.106	0.113	0.055	0.0163	0.0017	2.1	3
Fw II	V ₍₃₎	0.863	1.9	-0.038	0.559	-0.435	-0.501	0.125	0.0166	0.104	0.0639	2.0	3
	V ₍₅₎	0.845	1.5	-0.015	0.64	-0.24	-0.36	-	-	-	-	2.0	2
	M ₍₂₎	0.578	0.42	0.092	0.46	-0.0018	0.202	-0.018	-0.065	-0.069	-0.034	2.1	3
	Z ₍₄₎	0.570	0.850	0.023	0.227	0.054	-0.21	-0.117	0.0061	0.12	0.067	1.9	3
Fw III	V ₍₃₎	0.863	0.89	0.067	0.599	-0.43	-0.45	0.159	-0.012	0.022	0.070	2.0	3
	Z ₍₄₎	0.57	1.08	-0.002	0.22	0.0502	-0.23	-0.12	0.012	0.124	0.065	1.9	3
Fw IV	V ₍₄₎	0.862	-1.6	-0.012	-0.600	0.42	0.46	-0.12	-0.007	-0.098	-0.067	2.1	3
	N ₍₄₎	0.615	-0.64	-0.028	-0.44	0.122	-0.15	0.029	0.014	0.003	0.11	2.1	3

Tabla 7.

Coefficientes de correlación múltiple, coeficientes de regresión y constantes de regresión para la relación entre las series de los coeficientes de los eigenvectores (Fw) y las series de velocidad del viento (V) y dirección (M)

Los valores en parentesis son los números de las estaciones

La distribución normal de los residuos vale cuando la relación Durbin - Wats se encuentra entre 1.5 y 2.3 .

tor, la serie de la componente meridional en la estación 2, con un coeficiente de regresión de 0.59 explica casi el 35% de la variancia total y puede así considerarse muy significativo. El signo positivo de a_1 muestra que con componente fuerte del Norte (valores positivos de x_t) se observa un aumento de los coeficientes de los eigenvectores, es decir, una disminución de los niveles de SO_2 . Las velocidades bajas preferentemente del Sur, inducen según este análisis a una distribución meteorológica favorable en la muestra 1.

Los coeficientes de correlación múltiple más altos se encuentran entre los coeficientes del segundo eigenvector y la velocidad del viento en las estaciones 2 y 5. El signo negativo de a_1 en ambos casos muestra que un aumento de la velocidad del viento está ligado a un decrecimiento de los coeficientes decrecientes de los eigenvectores.

Los coeficientes decrecientes de los eigenvectores en el segundo eigenvector significa, sin embargo, que la distribución de los componentes de los eigenvectores pierde significado.

La dirección del viento en la estación 2 determina el correspondiente alto valor de los coeficientes de correlación múltiple en la muestra de distribución II. Los valores positivos de a_1 significan que un aumento de la componente meridional (vientos del Norte) indican una mayor significancia de esta distribución. Lo mismo ocurre para la componente zonal de la estación 4 cuando soplan vientos del Este (valores positivos de la componente zonal). La variación de las líneas de iguales componentes de los eigenvectores muestra también ópticamente la significación para estas dos direcciones. La distribución del segundo eigenvector es según este análisis, muy significativa, cuando dominan los vientos de intensidad débil de las direcciones Norte y Este.

La distribución del tercer eigenvector se determina principalmente con la intensidad del viento en la estación 3. a_y es positivo y las altas velocidades del viento intensifican en este caso el significado de esta distribución.

En relación con la dirección del viento la componente zonal de la estación 4 resulta significativa. Mientras más grande y negativa la componente zonal (viento del W), más dominante será la distribución de la III. En este caso el SO_2 del área central sería transportado desde el borde W de la ciudad. Si se considera la distribución de las fuentes de emisión

de SO_2 (fig. 9d), esta distribución es muy importante.

Para los coeficientes de los eigenvectores IV, un aumento de la velocidad del viento está ligada con una disminución de los coeficientes de los eigenvectores, es decir, está relacionada con una mayor significación de la distribución de la muestra. En este caso domina en los coeficientes de correlación la componente meridional en la estación 4. Puesto que a_1 es negativa, los valores positivos altos de x_t (viento del N) conducen a valores altos negativos de los coeficientes de los eigenvectores. Esto significa sin embargo (Figs. 11 y 12) que la distribución IV está muy estrechamente ligada con los vientos del Norte de intensidad moderada. En forma semejante, en las distribuciones V y VI se puede ver que son poco significativas con respecto al parámetro del viento en las 4 estaciones. Aquí, los efectos locales muy localizados (como por ejemplo cerca del aeropuerto) parecen tener relevancia para explicar la distribución de la muestra. La distribución de la muestra puede todavía examinarse a la luz de la serie temporal. Esta serie se lee para los días individuales (Fig. 12). En la Fig. 14 se representan las condiciones medias, por medio de los coeficientes de los eigenvectores. El primer eigenvector acusa un máximo de significación alrededor de las 10 hs., como lo muestran los coeficientes de los eigenvectores negativos a esta hora. Una hora después aproximadamente, muestran un máximo en promedio los coeficientes del segundo eigenvector (fig. 11 y 12); esto significa que la distribución I puede ser reemplazada a la distribución II, es decir, que la distribución II predomina. De manera que cuando soplan vientos con componentes del Norte, se retrasa en promedio una hora la culminación del valor de SO_2 .

Los valores máximos de SO_2 no aparecen en el área central como en el caso de los vientos débiles o calmas, sino más bien se acusan en la zona W de la ciudad.

Puede apreciarse claramente de la fig. 12, que alrededor de las 10 hs. predomina el tipo I mientras que a las 12 domina el tipo II.

Los coeficientes positivos altos se pueden reconocer en el eigenvector III por la prevalencia de la distribución de la muestra III (figs. 11 y 12). En promedio, los valores máximos aparecen a las 11 hs. En la fig. 12 se aprecia que el tipo I es seguido por el tipo III, cuando el tipo II no aparece. Si el tipo II aparece, entonces falta el tipo III. En los días en que pre-

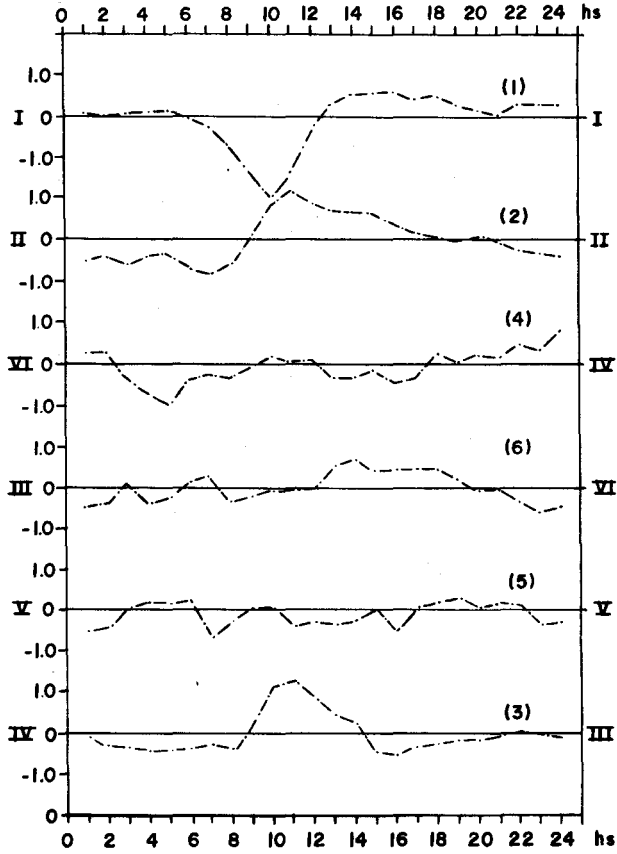


FIG. 14. VALORES MEDIOS HORARIOS DE LOS COEFICIENTES DE LOS EIGENVECTORES PARA LOS EIGENVECTORES I - VI.

valecen vientos débiles del NE por la mañana el tipo II sigue al tipo I. Si después de las 10 soplan vientos fuertes del W entonces el tipo III sigue al I.

Los valores negativos altos de los coeficientes de los eigenvectores del IV eigenvector representan la prevalencia de la distribución IV. Los valores máximos negativos de los coeficientes de los eigenvectores aparecen en promedio alrededor de las 5 a.m. y a las 16 hs. En los días con vientos del Norte de intensidad alta domina el tipo IV. Por la noche se establece (como lo muestra la fig. 5) el tipo I de distribución que es semejante. Si prevalece el tipo de vientos de "Norte", este tipo es sustituido por el tipo IV.

En la fig. 15 se pueden comprobar los resultados anteriores, donde aparecen las isocronas de la hora en que ocurren los picos de concentración del SO_2 . En el área del centro el máximo ocurre 1 hora y media más temprano que en la periferia. Puesto que no se cuenta con datos en la altura sólo se puede especular.

Quizá el efecto de la isla de calor y la elevación resultante de la base de la inversión en el centro de la ciudad, adelantan la hora del mezclado vertical con respecto a la periferia. Si además prevalecen aún vientos débiles del Norte (tipo II), entonces las impurezas serían transportadas hacia el W (fig. 15) produciendo ahí un retraso en la ocurrencia del pico de concentración de SO_2 .

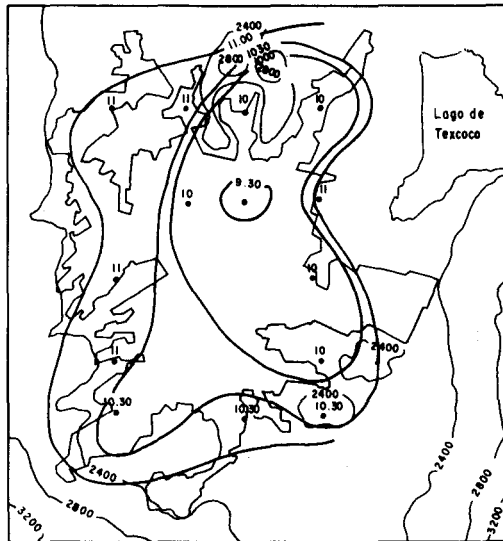


Fig. 15: Hora de ocurrencia de los picos de concentración de SO₂ en la ciudad de México.

CONCLUSIONES

El presente análisis demuestra que existe una periodicidad diurna en las variaciones de las concentraciones del SO_2 . Estas variaciones están asociadas con distribuciones espaciales características (tipos I-VI) y pueden explicarse por medio de la circulación del viento superficial (intensidad y dirección). Por medio de correlaciones múltiples las ecuaciones 2 y 3 permiten la posibilidad de intentar un pronóstico a corto plazo de las concentraciones del SO_2 con los datos del viento.

RECONOCIMIENTO

Los autores agradecen a las autoridades correspondientes de la Subsecretaría del Mejoramiento del Ambiente, las facilidades para la obtención de los datos meteorológicos y de concentraciones de contaminantes utilizados en este trabajo. La información fue procesada y grabada en cinta magnética por el físico César Moreno. Los cálculos fueron realizados en el Instituto de Matemáticas de la Universidad de Bonn. El trabajo estenográfico lo hizo la Sra. Ma. Cristina Medina. El Lic. Francisco Cruz se encargó de la extracción parcial de los datos.

BIBLIOGRAFIA

- BLACKMAN, R. B., J. W. TUKEY, 1958. The measurement of power spectra. Dover Publication, pp. 190, New York.
- CRADDOCK, J. M., C. R. FLOOD, 1969. Eigenvectors for Representing 500 mb Geopotential surface over the Northern Hemisphere. Quart. Journ. of the Royal Meteor. Soc. Vol. 95/405, pp. 576-593.
- EGAN, B. A., E. C. VANDO, 1978. Assessing Air Quality Levels in Regions of Mountainous Terrain. WMO-Symposium on Boundary Layer Physics applied to Specific Problems of Air Pollution. Norrköping, 19.-23.6. 1978, WMO-No. 510, Genf., 1978.
- HILL, H., 1969. Temperature variability and synoptic fronts in the Winter climate of Mexico. McGill University. Climat. Series 4, Montreal.
- JÁUREGUI, E., 1969. Aspectos meteorológicos de la contaminación del aire en la ciudad de México. Ing. Hidr. en México, vol. 23 (1).
- JÁUREGUI, E., 1971. Variaciones de largo período de los tipos de tiempo de superficie en México. Bol. No. 4. Instituto de Geografía, UNAM, México.
- JÁUREGUI, E., 1973a. The Urban Climate of Mexico City. Erdkunde, Vol. 27/4, p. 298-307.
- JÁUREGUI, E., 1973b. Untersuchungen zum Stadtklima von Mexiko Stadt. Selbstverlag, Bonn, pp. 163.
- JÁUREGUI, E., 1973c. Microclima del bosque de Chapultepec. Bol. 5, Instituto de Geografía. UNAM.
- JÁUREGUI, E., D. KLAUS, y W. LAUER, 1979. Análisis de correlación entre las concentraciones de contaminantes y factores meteorológicos en la ciudad de México. (En prensa).
- JÁUREGUI, E., 1979. Distribución espacial y temporal del SO₂ en la ciudad de México. (En prensa).
- GALINDO, I., 1962. La radiación solar en México durante el año Geofísico Internacional, Inst. de Geofísica, UNAM, México.
- KLAUS, D., 1975. Niederschlagsgenese und Niederschlagsverteilung im Hochbecken von Puebla-Tlaxcala, Bonner Geogr. Abhandlg. Heft 53.
- KLAUS, D., 1976. Trübungsbestimmungen mit dem Selenzellen-Kleinphotometer in den Hochtälern von Puebla-Tlaxcala und von Mexiko. Mitteilungen des Interdisziplinären Sonderbereichs Umweltschutz, Vol. 5, p. 34-67.
- KUTZBACH, J. E., 1970. Large-scale Features of monthly mean Northern Hemisphere Anomaly Maps of Sea-Level Pressure. Monthly Weather Rev. Vol. 98/9, p. 708-716.
- LAUER, W., 1970. Naturwissenschaftliche Arbeiten im Rahmen des Mexiko-Projektes des Deutschen Forschungsgemeinschaft. Deutsche Geogr. Forschungen in der Welt von Heute. p. 29-38.

- LAUER, W., D. KLAUS, 1975. The Thermal Circulation of the Central Mexican Meseta Region within Influence of Trade Winds. Arch. Met. Biokl. Ser. B, Vol. 23, pp. 343-366.
- MANES, A., M. RINDSBERGER, 1978. On resolving the relative contribution of an elevated single source to the surface concentration field in an Urban Area. WNO-No. 510, Genf. 1978.
- MITHELL, J. M., 1966. Climatic Change. WMO-No. 195, Techn. Note No. 79, pp. 100, Genf, 1966.
- PANOFSKY, H. A., G. W. BRIER, 1958. Some Applications of Statistics to Meteorology. College of Mineral Industr., Pennsylvania State Univ., pp. 224, University Park, Pa.
- PRINZ, B., H. STRATMANN, 1968. The possible use of factor analysis in Investigating Air Quality. Staub-Reinhaltung, Luft, vol. 28, No. 1, pp. 33-38.
- SCHMIDT, F. H., 1970. The Effect of Stability on the Dust content in Cities. WMO, Techn, Note No. 108, p. 273-279.
- SHIKATA, H., K. ASAKURA, 1978. Simulation Method for Multiple Source Diffusion with correction Factors relating to the Scale of the Source. WMO-No. 510, Genf, 1978.
- SKAGGS, R. H., 1975. Drought in the United States 1931-1940. Annals of the Assoc. of American Geographers. Vol. 65/3, p. 391-402.
- TAUBENHEIM, J., 1969. Statistische Auswertung geophysikalischer und meteorologischer Daten. Akademische Gesellschaft, Leipzig p. 386.
- TIAO, G. C., G. E. P. BOX, W. J. HAMMING, 1975. An statistical Analysis of the Los Angeles Ambient Carbon Monoxide Data 1955-1972. Journ. Air Pollution Control Ass. Vol. 25/11, p. 1129-1136.
- WETZEL, W. HRSQ., 1970. Neuere Entwicklungen auf dem Gebiet der Zeitreihenanalyse. Göttingen, p. 164. Sonderheft zum Statistischen Archiv, Heft 1.