

ANÁLISIS ESPECTRAL DEL VIENTO Y PARTÍCULAS MENORES DE 10 MICRÓMETROS (PM_{10}) EN EL ÁREA METROPOLITANA DE MONTERREY, MÉXICO

José Luis ARREOLA-CONTRERAS* y Graciela GONZÁLEZ

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Monterrey, Monterrey, Nuevo León, México

(Recibido noviembre 1998, aceptado mayo 1999)

Palabras clave: monitoreo ambiental, series de tiempo, calidad del aire, variabilidad temporal

RESUMEN

En este trabajo se presenta la aplicación de una metodología estadística de análisis de series de tiempo, con la finalidad de caracterizar la relación temporal (a través de estructuras de variabilidad compartida) entre el viento de superficie y la concentración de partículas menores de 10 micrómetros (PM_{10}), utilizando la información registrada por la red de monitoreo ambiental del Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA) en el Área Metropolitana de Monterrey (AMM), México, durante 1995. Los resultados de mayor relevancia muestran las características estacionales durante verano e invierno, en términos de los períodos cíclicos de variación diurna (c/24 horas), semidiurna (c/12 horas) y de periodo largo (>24 horas). Por otra parte, se caracteriza la persistencia del viento, así como la estructura de su variación y de las PM_{10} en diferentes bandas de frecuencia espectral cruzada.

ABSTRACT

This work describes a statistical methodology of time series analysis by characterizing the temporal variability between the surface wind and the concentration of particles smaller than 10 micrometers (PM_{10}). The data were gathered in the Metropolitan Area of Monterrey, Mexico during 1995, by the environmental monitoring net of SIMA (Sistema Integral de Monitoreo Ambiental). The persistence of the wind was characterized as the variation between wind and particles (PM_{10}) in different crossed spectral bands. The major results show the contrasting seasonal characteristics during summer and winter, in terms of the cyclical periods of diurnal variation (ea. 24 hours), semidiurnal (ea. 12 hours), and periods longer than 24 hours.

INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica se considera ya como parte integral de lo que se conoce como vida moderna. Esta situación es la consecuencia de la manera en que se rigen todas las actividades de transporte, producción de bienes y servicios y recreación, entre otros. Sin embargo, paradójicamente la cau-

sa principal de esta problemática se debe a un componente de singular ponderación: los procesos de combustión, esenciales como parámetros de bienestar y confort para la forma de vida del ser humano (Adamson *et al.* 1996). En los últimos años, la necesidad de obtener información sobre los efectos que ocasionan al ambiente y a la salud pública las emisiones de sustancias nocivas a la atmósfera, tales como las partícu-

* Dirección actual: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA. Subcoordinación de Hidrometeorología, Paseo Cuauhnáhuac 8532. Col. Progreso. 62550 Jiutepec, Morelos, México. Tel: (73) 19 40 00 (Ext. 525). Fax: (73) 19 43 41. Correo electrónico: jarreola@tlaloc.imta.mx

las menores de 10 micrómetros (PM_{10}), se han incrementado de manera significativa principalmente en las grandes ciudades o áreas conurbadas con intensa actividad de procesos industriales y elevado flujo vehicular de automotores (Villalobos-Pietrini *et al.* 1995); tal es el caso del Área Metropolitana de Monterrey (AMM), donde las emisiones de contaminantes debidas a las actividades humanas por quema de combustibles fósiles a la atmósfera, han deteriorado dramáticamente los índices de la calidad del aire (SEDUOP 1996).

Por otra parte, las mediciones de las concentraciones atmosféricas de las PM_{10} , así como de variables meteorológicas como el viento de superficie, se realizan por medio de redes o sistemas de monitoreo ambiental, que tienen como objetivo principal determinar e identificar la concentración de sustancias contaminantes en una región o área determinada, realizando evaluaciones en intervalos de tiempo regular y en sitios o lugares distribuidos irregularmente (Myers 1994, Rao *et al.* 1995). En este trabajo se presenta la aplicación de una metodología estadística de análisis de series de tiempo, con la finalidad de caracterizar la estructura de variabilidad temporal y patrones de correlación espectral entre el viento de superficie (intensidad y dirección) y las PM_{10} en el AMM, durante 1995.

Área Metropolitana de Monterrey (AMM)

El acelerado crecimiento demográfico a partir de las dos últimas décadas, así como el incremento en las actividades del sector industrial en el AMM, han originado problemas de contaminación ambiental en el aire, el agua y el suelo (Comisión de Conurbación del Área Metropolitana de Monterrey 1988, SEDUOP 1996). Además, la fuerte polarización económica, política y social que existe en torno a este núcleo metropolitano, ha generado un proceso acumulado asentado fundamentalmente en el área conurbada de los municipios de Monterrey, Guadalupe, Apodaca, General Escobedo, Santa Catarina, San Nicolás de los Garza, San Pedro Garza García y recientemente García y Juárez; además, el AMM se integra fuertemente a su periferia constituida por 13 municipios más (INEGI 1986, Comisión de Conurbación del Área Metropolitana de Monterrey 1988, SEDUOP 1996). Por otra parte, los estudios de investigación del ambiente físico relativos a la modelación de la contaminación atmosférica, sugieren que las relaciones existentes entre la cantidad de emisiones por diferentes fuentes y los índices de la calidad del aire en cada región específica, dependen tanto de la composición química y de la concentración de sustancias nocivas, como de la ubicación geográfica y de las condiciones meteorológicas y climatológicas del entorno en el área de estudio (Georgopoulos y Seinfeld 1982, Hanna 1988, Zannetti 1990).

Descripción Climática

En la guía para la interpretación de cartografía: climatología, que publica el INEGI (1990) se describe detalladamente

la localización del AMM en una zona climática subtropical de alta presión atmosférica, con efectos orográficos significativos en la regulación del comportamiento climático del entorno de la región. De acuerdo con la clasificación climática de Köppen para la República Mexicana, el clima característico que predomina para el valle de Monterrey es seco estepario, cálido y extremoso, con una temperatura anual media de 22°C y precipitaciones pluviales irregulares durante el verano. Las temperaturas extremas máximas y mínimas de variación interestacional son mayores de 40°C durante el verano y menores de 0°C en el período invernal. La cantidad de precipitación pluvial anual promedio oscila entre 400 y 700 milímetros con una significativa variabilidad espacial e interanual (Comisión de Conurbación del Área Metropolitana de Monterrey 1988). Los sistemas atmosféricos de mesoescala que predominan sobre las condiciones meteorológicas sinópticas y el régimen de viento para el AMM, presentan características de variación estacional diferenciadas durante el verano e invierno (INEGI 1990). La circulación atmosférica de verano se caracteriza por la predominancia de los vientos alisios con elevado contenido de humedad y flujos de calor sensible y latente. Esto se debe al sistema de alta presión semipermanente localizado en el Océano Atlántico que mantiene vientos de componente oriental durante el verano y al pasar por el Caribe y/o Golfo de México, incorpora humedad a través del aire caliente con gran contenido de vapor de agua de las capas adyacentes al espejo de agua. En toda la parte sur del sistema de alta presión se pueden presentar perturbaciones de tipo ciclónico que en los mapas meteorológicos se detectan como ondulaciones llamadas ondas tropicales y que si se complementan con otros factores meteorológicos pueden dar lugar a las tormentas tropicales y huracanes. Por otra parte, el régimen de viento de la circulación atmosférica de invierno se caracteriza por la presencia de aire continental polar y subpolar con orígenes en las regiones geográficas árticas y subárticas, respectivamente. En este período, los flujos de humedad y calor (sensible y latente) disminuyen considerablemente con relación a la influencia de origen tropical y es en esta época cuando se presentan los eventos ciclónicos de origen extratropical conocidos como frentes fríos o "nortes". El movimiento de estos eventos ciclónicos siempre viene precedido por un sistema de alta presión, haciendo que el conjunto de tales fenómenos meteorológicos se muevan normalmente hacia el sureste, la mayoría de las veces que se presentan.

Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA)

La red del SIMA se compone de 5 estaciones de registro, ubicadas estratégicamente con base en criterios de estudios meteorológicos, epidemiológicos, de uso del suelo y densidad poblacional (SEDUOP 1996). Las estaciones de registro relativas al AMM son las siguientes: La Pastora al sureste (SE), San Nicolás de los Garza al noreste (NE), San Bernabé al noroeste (NO), Santa Catarina al suroeste (SO) y por último El Obispado al centro (CE) del AMM (Fig. 1). Las con-

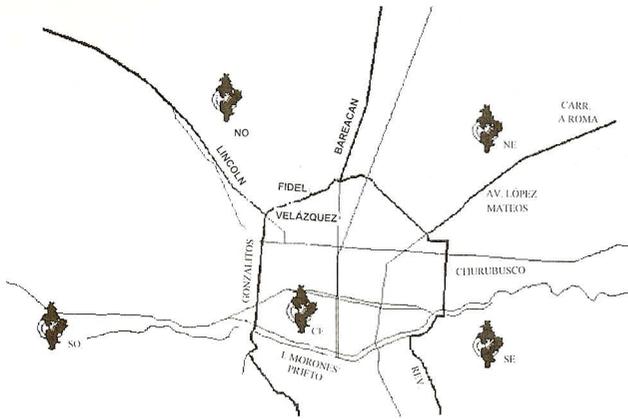


Fig. 1. Ubicación de las estaciones de monitoreo ambiental del SIMA en el área metropolitana de Monterrey, AMM, México. SE=Sureste La Pastora, NE=Noreste San Nicolás, CE=Centro El Obispo, NO=Noroeste San Bernabé, SO=Suroeste Santa Catarina

centraciones registradas en estas estaciones de monitoreo, son: partículas menores a 10 micrómetros (PM₁₀), óxidos de nitrógeno (NO_x), ozono (O₃), dióxido de azufre (SO₂) y monóxido de carbono (CO). Además, se reportan algunas variables meteorológicas como la temperatura ambiente y la dirección y la magnitud del viento. Asimismo, en una estación localizada al sureste (SE) del AMM, se registran radiación solar, presión atmosférica y precipitación pluvial. Por otra parte, en cada una de las estaciones de monitoreo la medición de estas concentraciones se realiza a 4.5 metros de altura sobre el nivel del suelo. En el caso de la magnitud y de la dirección del viento, la localización de los sensores se encuentra a 10 metros de altura sobre la superficie del lugar de monitoreo. Los registros de los datos se hacen a intervalos de una hora y la longitud mensual para cada una de las series, es mayor o igual a 20 días de registro continuo. En este sentido, no se completaron datos faltantes en las series que se analizaron y también se verificó que la información de cada una de las series no tuviera errores o anomalías técnicas en la operación, el registro y el manejo. Con relación al programa de mantenimiento de los instrumentos meteorológicos y de los analizadores ambientales de la red de monitoreo, diariamente se lleva a cabo la verificación de la operación del equipo y una vez por mes se realiza la calibración de acuerdo con los lineamientos especificados por la Agencia de Protección Ambiental de los EUA (SIMA 1995).

Objetivos

- Describir la variación temporal de las PM₁₀ y su relación con la intensidad y la persistencia del viento de superficie.
- Caracterizar la estructura espectral de la intensidad del viento de superficie y las PM₁₀.
- Determinar los patrones de correlación espectral entre la intensidad del viento de superficie y las PM₁₀.
- Evaluar los resultados obtenidos para entender mejor los

mecanismos dinámicos que regulan la variación temporal del viento de superficie y su relación con las PM₁₀ en el área de estudio.

METODOLOGÍA

Las series o registros de datos que se utilizaron para desarrollar este trabajo, fueron proporcionados por la red de monitoreo ambiental del SIMA a través de la Subsecretaría de Ecología del Gobierno del Estado de Nuevo León (SIMA, 1995). Así, la primera etapa del análisis consistió en descomponer el vector velocidad en coordenadas cartesianas $u(t)$ y $v(t)$, donde, $u(t)$ representa la magnitud del vector velocidad proyectada sobre un eje coordinado Este-Oeste (E-W): E para magnitudes con dirección positiva y W negativa. Por otra parte, la magnitud $v(t)$ es la proyección sobre un eje coordinado Norte-Sur (N-S): N para magnitudes con dirección positiva y S negativa. A partir de esta descomposición cartesiana del vector velocidad, un parámetro de gran utilidad para describir la variabilidad de la dirección del viento es la *persistencia* (Reyes y Vogel 1983):

$$p_1 = \overline{[u^2 + v^2]}^{1/2} ; p_2 = \overline{[u^2 + v^2]}^{1/2} ; P = p_1 / p_2 \quad (1)$$

donde, p_1 representa la raíz cuadrada de la suma del cuadrado promedio de las componentes cartesianas y p_2 es la raíz cuadrada del promedio de la suma del cuadrado de las componentes del vector velocidad; así, la cantidad escalar P se encuentra acotada entre [0, 1] y se utiliza como una medida de la magnitud de la persistencia del viento. Por otra parte, un resultado relevante se deriva de la definición de par transformado de Fourier (Priestley 1981), ya que es posible medir, mediante técnicas digitales, la forma en que se distribuye la energía en una serie de tiempo en el dominio de la frecuencia. Así, la estimación de la función densidad de potencia espectral no normalizada $h_x(\omega)$, se obtiene de la siguiente manera:

$$h'_x(\omega) = (2\pi/N) \sum_{k=-[N/2]}^{[N/2]} I_{N,x'}(\omega_k) W_n(\omega - \omega_k) \quad (2)$$

donde, $I_{N,x'}(\omega_k)$ representa el periodograma del proceso aleatorio (bajo condiciones estacionarias), $\{X'_t\}$, para $t=1, \dots, N$ y $W_n(\theta)$ es la ventana espectral o "kernel". De la misma forma que en la ecuación (2), el concepto de *función densidad de potencia espectral cruzada o correlación cruzada* $h_{XY}(\omega)$ entre dos procesos estocásticos estacionarios, se representa en coordenadas polares de la siguiente manera (Priestley 1981):

$$h_{XY}(\omega) = \alpha_{XY}(\omega) \exp \{i \phi_{XY}(\omega)\} \quad (3)$$

además, $\alpha_{XY}(\omega)$ representa la estimación del *espectro de amplitud cruzada*, que se obtiene a partir del *co-espectro*

$[c'_{XY}(\omega)]$ y *espectro de cuadratura* $[q'_{XY}(\omega)]$, donde:

$$\alpha'_{XY}(\omega) = [c'^2_{XY}(\omega) + q'^2_{XY}(\omega)]^{1/2} \quad (4)$$

y el espectro de fase:

$$\phi'_{XY}(\omega) = \tan^{-1} \{-q'_{XY}(\omega) / c'_{XY}(\omega)\}^{1/2} \quad (5)$$

Por último, en las técnicas de análisis espectral un parámetro estadístico de gran utilidad es la *función o espectro de coherencia*, que establece un criterio de certidumbre para la función de respuesta estimada en la ecuación (3). La representación de la *función coherencia* se define de la siguiente manera (Priestley 1981):

$$|\gamma_{XY}(\omega)| = \{ [c'^2_{XY}(\omega) + q'^2_{XY}(\omega)] / [h'_X(\omega) h'_Y(\omega)] \}^{1/2} \quad (6)$$

donde, la cantidad $\gamma_{XY}(\omega)$ se encuentra acotada entre [0,1] y representa una medida de confiabilidad y dependencia estadística entre $h'_X(\omega)$ y $h'_Y(\omega)$. En este sentido, se tiene que cuando $\gamma_{XY}(\omega) \rightarrow 0$ en la frecuencia ω_0 , entonces se dice que $h'_X(\omega)$ y $h'_Y(\omega)$ no se encuentran coherentemente correlacionadas en la frecuencia ω_0 . Ahora bien, si $\gamma_{XY}(\omega) \rightarrow 0$ para toda frecuencia ω , entonces $h'_X(\omega)$ y $h'_Y(\omega)$ son eventos estadísticamente independientes. Por otra parte, si $\gamma_{XY}(\omega) \rightarrow 1$ en la frecuencia ω_0 , entonces se dice que $h'_X(\omega)$ y $h'_Y(\omega)$ son eventos significativamente coherentes y por lo tanto estadísticamente dependientes.

RESULTADOS

En la **tabla I** se presentan las principales características mensuales del viento con mayor contraste de variación estacional durante verano e invierno en las 5 estaciones de monitoreo: La Pastora, San Nicolás, El Obispado, San Bernabé y Santa Catarina (Fig. 1). Se observa que durante los meses

típicos de invierno (diciembre, enero y febrero) la intensidad promedio, así como la varianza, la persistencia y la densidad espectral o periodo de variación cíclico diurno (c/24 horas), son cantidades menores con relación a los meses típicos de verano (junio, julio y agosto). Otra característica relevante se observa en la dirección persistente del viento, así como en la varianza mensual de la intensidad del viento explicada por la variación diurna (c/24 horas).

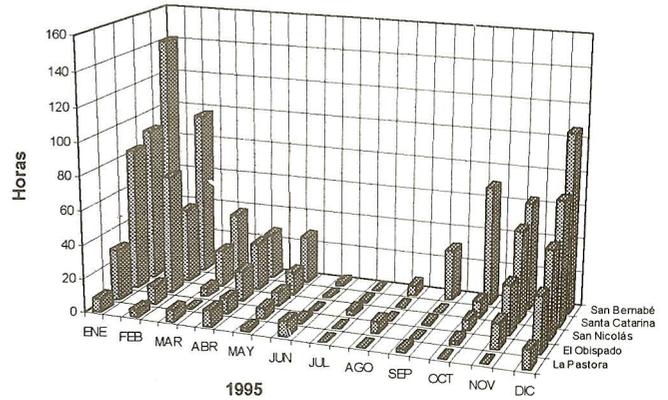


Fig. 2. Número relativo de horas con concentraciones mayores que 150 µg/m³.

Durante el invierno, la persistencia del viento es variable sin una predominancia bien definida y cantidades de variación cíclica diurna (c/24 horas) menores que 50%. Por otra parte, durante el verano, la predominancia en la dirección del viento es bien definida del noreste (NE), con excepción de San Bernabé, que presenta índice de persistencia (0.81) del sureste (SE). En cuanto a los valores de la densidad espectral que explican la variación del viento diurno, se observan cantidades que oscilan entre 68% (La Pastora) y 87% (El Obispado).

TABLA I. PARÁMETROS MENSUALES DEL VIENTO DE SUPERFICIE REPRESENTATIVOS DE VERANO E INVIERNO DE 1995*

| | La Pastora | San Nicolás | El Obispado | San Bernabé | Sta. Catarina |
|-----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| Invierno | Diciembre | Diciembre | Febrero | Enero | Febrero |
| Promedio | 7.88 | 7.52 | 7.03 | 9.41 | 8.24 |
| Varianza | 25.38 | 12.37 | 14.44 | 29.75 | 30.71 |
| Persistencia | 0.27 | 0.36 | 0.34 | 0.17 | 0.36 |
| Dirección | variable | variable | variable | variable | variable |
| Período | 41 % (diu) |
| Verano | Julio | Julio | Julio | Junio | Junio |
| Promedio | 13.36 | 10.85 | 9.13 | 14.07 | 12 |
| Varianza | 47.46 | 25.08 | 16.6 | 41.66 | 34.67 |
| Persistencia | 0.75 | 0.74 | 0.66 | 0.81 | 0.85 |
| Dirección | noreste (NE) | noreste (NE) | noreste (NE) | sureste (SE) | noreste (NE) |
| Período | 68 % (diu) | 85 % (diu) | 87 % (diu) | 85 % (diu) | 78 % (diu) |

* Series de datos horarios en kilómetros por hora (km/h)

diu = periodo de variación diurno (c/24 h), NE = noreste, SE = sureste, dirección variable = índice de persistencia < 0.5 (ver ecuación 1)

TABLA II. PARÁMETROS ESTADÍSTICOS MENSUALES DE LA CONCENTRACIÓN DE PM₁₀, DURANTE VERANO E INVIERNO DE 1995

| | La Pastora | San Nicolás | El Obisado | San Bernabé | Sta. Catarina |
|-----------------|------------|-------------|------------|-------------|---------------|
| Invierno | Diciembre | Enero | Enero | Enero | Enero |
| Promedio | 40.79 | 70.71 | 59.13 | 97.18 | 83.46 |
| Varianza | 917.1 | 4111.54 | 1910.41 | 6447.15 | 3673.69 |
| H. exced. | 11 | 84 | 30 | 141 | 91 |
| Periodo | 55 % (diu) | 43 % (sem) | 34 % (diu) | 43 % (sem) | 40 % (sem) |
| Verano | Julio | Junio | Julio | Julio | Agosto |
| Promedio | 33.21 | 41.39 | 35.07 | 61.49 | 31.16 |
| Varianza | 285.78 | 284.05 | 341.79 | 545.07 | 467.65 |
| H. exced. | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Periodo | 42 % (diu) | 47 % (diu) | 62 % (diu) | 42 % (sem) | 40 % (diu) |

* Series de datos horarios en microgramos por metro cúbico

diu = periodo de variación diario (c/24 h), sem = semidiurno (c/12 h), H. exced. = número relativo de horas con concentraciones excedentes

Por otra parte, en la **figura 2** se observa gráficamente el comportamiento de la variación mensual del número relativo de horas con concentraciones de PM₁₀ mayores de 150 µg/m³ en las 5 estaciones de monitoreo del SIMA, durante 1995. Los meses que presentan mayor número relativo de horas, son: enero, febrero, noviembre y diciembre; en cambio, durante los meses típicos de verano, junio, julio y agosto, la cantidad de horas excedentes son menores en comparación con el periodo invernal. Además de este contraste del comportamiento estacional verano e invierno, existe un gradiente en términos de su distribución espacial de monitoreo, es decir, del sureste (estación de monitoreo La Pastora) hacia el centro (El Obisado), el noreste (San Nicolás de los Garza) y principalmente hacia el suroeste (Santa Catarina) y el noroeste (San Bernabé) con el mayor número de horas excedentes.

Durante los meses de invierno se presentan mayores concentraciones de PM₁₀ que en verano, debido a que las condiciones meteorológicas no favorecen la dispersión de los contaminantes durante los meses fríos, aunado a que las principales fuentes de emisión de partículas están ubicadas al oeste del AMM (SEDUOP 1996). Es así como el mayor impacto del número relativo de horas con concentraciones mayores que 150 µg/m³ se localiza en las estaciones de San Bernabé y Santa Catarina (**Fig. 2**).

En la **tabla II** se presentan las principales características estadísticas de la concentración de PM₁₀, que manifestaron, como era de esperarse, su mayor variación estacional durante verano e invierno en las 5 estaciones de monitoreo. En los meses de invierno (diciembre, enero y febrero) la magnitud promedio, así como la varianza y el número relativo de horas con mas que 150 µg/m³ son mas elevados que en los meses de verano (junio, julio y agosto). Por otra parte, el cálculo de las densidades espectrales o periodos de variación cíclica, presenta varianzas con mayor ponderación en el ciclo de variación diario (c/24 horas) que semidiurno (c/12 horas) durante el verano y predominancia del ciclo semidiurno sobre el diario en el invierno.

En las **figuras 3 y 4**, se observan las características de variabilidad mensual entre el viento superficial y la concentración de PM₁₀, con relación a la estimación de la densidad espectral. Se aprecia que las magnitudes son inversamente proporcionales, es decir, cuando el viento es más intenso durante los meses característicos de verano (junio, julio y agosto), las densidades espectrales de la concentración de partículas disminuyen y viceversa, cuando la intensidad del viento decrece durante los meses típicos de invierno (diciembre, enero y febrero), la densidad espectral de partículas se incrementa.

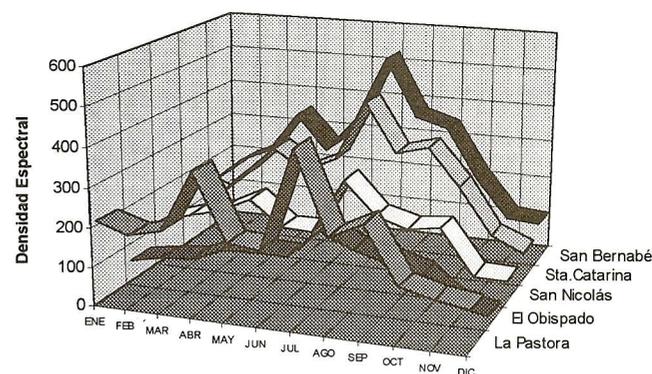


Fig. 3. Suma de la densidad espectral mensual del viento en (km/h)² CIC/H

En la **tabla III** se presentan los resultados de las relaciones espectrales, la correlación, la coherencia y la fase entre el viento y la concentración de PM₁₀. Se observa que la correlación cruzada entre estas dos variables corresponde a periodos de variación diaria (c/24 horas), con excepción de los lugares de monitoreo con mayor número relativo de horas que rebasan los 150 µg/m³, por ejemplo, durante el invierno en San Bernabé y San Nicolás se notan periodos cíclicos de variación mayores de 24 horas. Similarmente a esta carac-

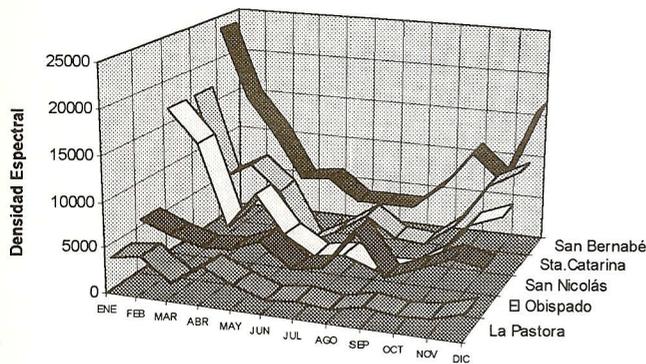


Fig. 4. Suma de la densidad espectral mensual de partículas (PM_{10}) en $(\mu\text{g}/\text{m}^3)^2 / \text{CIC}/\text{H}$

terística, en estas dos estaciones de monitoreo, los tiempos de desfase o períodos de respuesta entre estas 2 variables (viento y partículas) son mayores y con cantidades de coherencia relativamente bajas (de 0.3 a 0.4), con relación a los demás lugares de monitoreo.

DISCUSIÓN

En términos generales, la variabilidad temporal del viento a partir de los análisis de estadísticas básicas y de persistencia para determinar la dirección predominante con mayor significancia, se observa que el viento en el AMM presenta características de complejidad dinámica debida principalmente a la diferencia estacional (verano e invierno) asociada con la influencia de los sistemas atmosféricos de mesoescala y las irregularidades en los rasgos topográficos del área de estudio. Por otra parte, en las componentes de frecuencia espectral los períodos de variación cíclica con mayor ponderación son: diurno (c/24 horas), de orden mayor que diurno (>24 horas) y semidiurno (c/12 horas). Con respecto a la componente de frecuencia de periodo largo (> 24 horas), representa la variación cíclica de escala sinóptica o de eventos atmosféricos de mesoescala, tales como: viento debido a la actividad ciclónica tropical (depresiones, tormentas, huracanes, etcétera) durante el verano y ciclones extratropicales o frentes fríos asociados a la presencia de aire frío polar o ártico durante el invierno.

La distribución de las concentraciones de PM_{10} en los 5 sitios de monitoreo, muestran un gradiente espacial en términos de mas horas con cantidades mayores de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$, esto significa que San Bernabé, con excepción del periodo de verano (junio, julio y agosto), es la zona con mayor impacto de concentraciones. Enseguida en orden decreciente se encuentra Santa Catarina, San Nicolás de los Garza, El Obispado y por último La Pastora (Fig. 1). Por otro lado, durante el verano el gradiente de distribución espacial del número relativo de horas con concentraciones mayores que $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ se invierte en dirección, es decir, se presentan en

orden decreciente de la manera siguiente: La Pastora, El Obispado, San Nicolás de los Garza, Santa Catarina y San Bernabé, aunque en todas las estaciones de monitoreo con relación al invierno, presentan menor impacto relativo a las concentraciones permitidas.

Los ciclos de la variación temporal de partículas (PM_{10}), tienen mayor ponderación en los periodos diurno (c/24 horas) y semidiurno (c/12 horas), seguidos por el período de orden mayor que diurno (>24 horas) o de período largo. La característica predominante en el análisis de los espectros de potencia, revela que durante los meses invernales (enero, febrero y diciembre) la variación temporal semidiurna (c/12 horas) es la más significativa porcentualmente en el impacto de las concentraciones de PM_{10} en el AMM. Por otra parte, cuando la banda de frecuencia diurna (c/24 horas) es la de mayor ponderación, entonces la disminución del impacto de partículas se explica en términos de esta variación temporal, entre otras variables o factores que no se incluyen en este trabajo, tales como, la caracterización y la estimación de fuentes fijas y móviles de partículas, el análisis de series de datos de humedad relativa, la precipitación pluvial y la altura o capa de mezcla vertical del viento.

A partir del análisis espectral de correlación cruzada entre las series de datos del viento y la concentración de PM_{10} , se observa que el período de variación con mayor ponderación es principalmente diurno (c/24 horas), seguido del ciclo semidiurno (c/12 horas) y en algunos casos de escala sinóptica o de período largo (>24 horas), durante casi todos los meses del año y en las 5 estaciones de monitoreo. Por otro lado, sobre las características de dependencia espectral entre ambas series de análisis, los índices con mayor confiabilidad en términos de la coherencia y de los tiempos de respuesta en fase tienen la mayor densidad espectral cruzada con dos casos típicos de variación temporal estacional (invierno y verano), según la ubicación de la estación de monitoreo en el área de estudio (Fig. 1). Durante el invierno, en San Nicolás de los Garza, Santa Catarina y San Bernabé se observan las características de mayor impacto relativo al número de horas con concentraciones de mas de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En este caso de análisis, la densidad espectral con mayor significancia porcentual y coherencia confiable, se encuentra en el ciclo de variación semidiurno o de período largo.

En contraste, durante los meses de verano las condiciones más favorables de este índice de la calidad del aire y de la predominancia de la variación diurna (c/24 horas) tiene mayor confiabilidad, en términos de la coherencia y de los tiempos de respuesta en fase, característicos del transporte o acarreo de partículas por el viento superficial. Del análisis espectral de correlación cruzada en La Pastora y en El Obispado, se tiene el menor impacto en términos del número relativo de horas con concentraciones mayores que $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Por otra parte, la variación predominante ocurre en el período diurno (c/24 horas) durante todos los meses del año, con índices de coherencia confiables y tiempos de respuesta en fase característicos del transporte de partículas por el viento

TABLA III. PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DE CORRELACIÓN CRUZADA ENTRE EL VIENTO DE SUPERFICIE Y LA CONCENTRACIÓN DE PM₁₀ DURANTE LOS MESES REPRESENTATIVOS DE VERANO E INVIERNO DE 1995

| | La Pastora | San Nicolás | El Obispado | San Bernabé | Sta. Catarina |
|-----------------|------------|-------------|-------------|-------------|---------------|
| Invierno | Febrero | Febrero | Enero | Febrero | Enero |
| Coorelación | 56 % (diu) | 37 % (lar) | 48 % (diu) | 37 % (lar) | 44 % (diu) |
| Coherencia | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.3 | 0.4 |
| Fase | 2.67 h | 12.99 h | 6.88 h | 11.46 h | 4.96 h |
| Verano | Julio | Junio | Julio | Julio | Agosto |
| Coorelación | 62 % (diu) | 60 % (diu) | 83 % (diu) | 78 % (diu) | 73 % (diu) |
| Coherencia | 0.6 | 0.4 | 0.8 | 0.7 | 0.7 |
| Fase | 4.20 h | 2.67 h | 4.96 h | 3.05 h | 4.20 h |

* h = horas, diu = período de variación diurno (c/24 h), lar = periodo largo (> 24 h)

diurno o brisa.

La diferencia en la variación estacional (verano e invierno) del análisis de densidad espectral cruzada entre el viento y la concentración de partículas (PM₁₀), se debe principalmente a que la variación diurna del viento local (brisa) no está correlacionada con la variación temporal de las fuentes de emisión de partículas, además de otros mecanismos o variables, tales como la variación estacional de la humedad ambiental relativa, la precipitación pluvial, la altura o capa de mezcla vertical del viento y la caracterización de las fuentes de emisión.

CONCLUSIONES

Los resultados con mayor relevancia que se obtuvieron en el desarrollo de este trabajo, se mencionan a continuación: la intensidad promedio del viento es mayor durante el verano que en el invierno, con dirección persistente bien definida: este-sureste (ESE) o bien este-noreste (ENE). En cambio, durante el invierno no existe una dirección de viento con persistencia predominante. Sobre la variabilidad en tiempo de la concentración de PM₁₀, se observó una fuerte correlación con el viento de superficie, en términos del contraste de variación estacional durante verano e invierno. Las mayores concentraciones de PM₁₀ predominaron durante el invierno, con una distribución espacial creciente (de concentraciones menores a mayores), en el siguiente orden: La Pastora, El Obispado, San Nicolás de los Garza, Santa Catarina y San Bernabé. Sin embargo, durante el período de verano este gradiente espacial se invierte en dirección con concentraciones relativamente menores al período de invierno. La variabilidad temporal en términos del análisis espectral, tiene diferencias estacionales durante verano e invierno en la estimación de los espectros de potencia, así como de coherencia y desfaseamiento temporal entre la intensidad del viento y la concentración de PM₁₀. Durante el verano, la componente de frecuencia diurna (c/24 horas) predomina sobre la variación semidiurna (c/12 horas) y de período largo (o mayor que diurna). En cambio, durante el invierno la componente diurna es de menor magnitud que en el

verano. Las características de variación estacional se explican principalmente por dos causas: la primera se refiere a que las diferencias de calentamiento radiante entre el área conurbada y las laderas circunvecinas del AMM, es menor durante el invierno que en el verano. Por otra parte, las variaciones de período largo (o de escala sinóptica) asociadas con eventos meteorológicos de mesoescala, conocidos también como sistemas atmosféricos extratropicales o frentes fríos, modifican durante el período invernal la variación cíclica diurna de la circulación atmosférica local o brisa del sistema atmosférico urbano del AMM. Así, la aportación de este trabajo se circunscribe en presentar una alternativa metodológica para analizar, evaluar y entender mejor los mecanismos dinámicos que con diferentes escalas de variación en el tiempo, intervienen en el transporte de sustancias nocivas en la atmósfera, tales como la concentración de PM₁₀.

AGRADECIMIENTOS

Al personal de operación del Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA) de la Subsecretaría de Ecología del Gobierno del Estado de Nuevo León: Ricardo Pérez, Gustavo Chacón y Jaime Garza. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada durante la estancia del primer autor en el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, A. C., Campus Monterrey.

REFERENCIAS

- Adamson S., Bates R., Laslett R. y Pototschnig A. (1996). Energy use, air pollution, and environmental policy in Krakow: can economic incentives really help? World Bank Technical Paper, Number 308: Energy Series. The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank. Washington D. C., 67 p.
- Comisión de Conurbación del Área Metropolitana de Monterrey (1988). Plan director de desarrollo urbano del Área Metropolitana de Monterrey, 1988-2010. Grafo Print.

- Georgopoulos P.G. y Seinfeld J. H. (1982). Statistical distributions of air pollutant concentrations. *Environ. Sci. Tech.* *16*, 401A-415A.
- Hanna S. R. (1988). Air quality model evaluation and uncertainty. *Int. J. Air Pollut. Contr. Hazard. Waste Manag.* *38*, 406-412.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) (1986). Síntesis geográfica del Estado de Nuevo León. 1a. reimpresión. México, D.F., 170 p.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) (1990). Guías para la interpretación de cartografía: climatología. 2a. reimpresión. México, D.F., 50 p.
- Myers D.E. (1994). Statistical methods for interpolating spatial data. *J. Appl. Sci. Comput.* *1*, 283-318.
- Priestley M. B. (1981). *Spectral analysis and time series*. Academic Press, Nueva York, 890 p.
- Rao T. S., Zalewsky E. y Zurbenko I. G. (1995). Determining temporal and spatial variations in ozone air quality. *J. Air Waste Manag. Assoc.* *45*, 57-61.
- Reyes S. y Vogel G. (1983). Surface meteorological observations of the tropical Eastern Pacific region. *Rev. Geofis.* *14*, 85-93.
- SEDUOP (Secretaría de Desarrollo Urbano y Obras Públicas) (1996). Plan estatal de protección y preservación del medio ambiente: diagnóstico ambiental; objetivos y estrategias; plan de acción, 1996-2020. Gobierno del Estado de Nuevo León, Subsecretaría de Ecología.
- SIMA (Sistema Integral de Monitoreo Ambiental) (1995). Reporte anual de la calidad del aire en el Área Metropolitana de Monterrey. Gobierno del Estado de Nuevo León, Subsecretaría de Ecología.
- Villalobos-Pietrini R., Blanco S. y Gómez-Arroyo S. (1995). Mutagenicity assessment of airborne particles in Mexico City. *Atmos. Environ.* *29*, 517-524.
- Zannetti P. (1990). *Air pollution modeling: theories, computational methods and available software*. Van Nostrand Reinhold, Nueva York, 444 p.