

Humedad relativa, déficit de saturación, y valores pequeños de la rapidez del viento, en la formación de "smogs" en la Ciudad de La Habana

ROSENDO ÁLVAREZ, RAYMUNDO VEGA, y CARLOS LÓPEZ

RESUMEN

A partir de un conjunto de observaciones de ciertas variables en la estación Casablanca, La Habana, Cuba, se realiza un estudio de la relación existente entre la humedad relativa y el déficit de saturación bajo condiciones de "smog", encontrándose una ecuación de regresión lineal que explica más del 74% de la variación total. Además, tomando como variable de clasificación el déficit de saturación, se da a conocer un modelo de análisis de la varianza de clasificación doble, con una observación por casilla, mediante el cual se determinan niveles significativos con respecto a una estratificación de valores de humedad relativa y de la rapidez del viento. Finalmente, se dan conclusiones y recomendaciones.

1. INTRODUCCIÓN

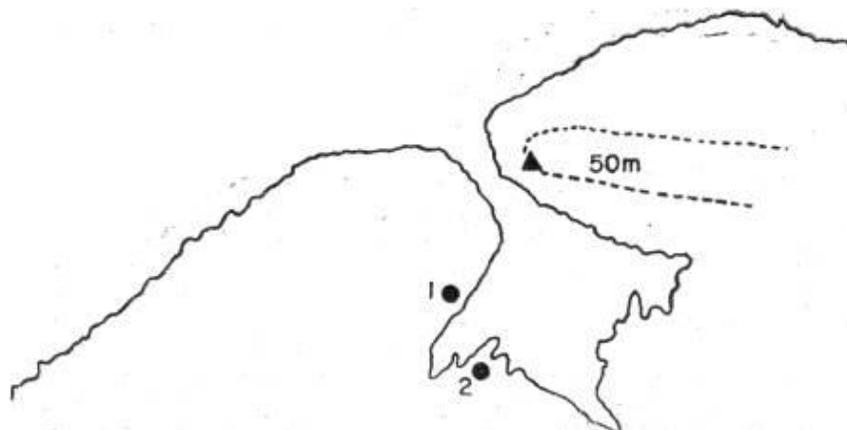
Desde hace varios años se estudia en diferentes países la condición de mezclamiento de la niebla con el humo industrial, bajo condiciones de inversión de temperatura, conocida con el nombre de "smog". Así, se ha estudiado la variación de los parámetros meteorológicos en condiciones de "smog" en Los Angeles (MC CORMICK, 1970; FORSDYKE, 1970); Londres (MEADE, 1959), y Tokio (SUZUKI, 1972).

También en la Ciudad de La Habana, en horas de la mañana, en ciertos días, puede verse una concentración de humo ligada a la niebla matinal, que en algunos casos ha provocado reacciones químicas con formación de SH_2 , dejando sus huellas en objetos terminados con algún contenido de plomo.

El trabajo que escribimos a continuación se elaboró con el objeto de tratar, mediante el estudio de las relaciones entre ciertas variables, de

Manuscrito aprobado el 26 de noviembre de 1983.

R. Álvarez, R. Vega, y C. López pertenecen al Instituto de Meteorología, de la Academia de Ciencias de Cuba.



▲ Servicio Meteorológico de Cuba.

1● Termoelectrica de Ciudad Habana.

2● Termoelectrica de Regla.

FIG. 1. Esquema de la Bahía de La Habana, con la ubicación de dos centrales termoelectricas y la sede del Servicio Meteorológico de Cuba.

elaborar un método que sirva para el pronóstico de este fenómeno indeseable y que permita, en caso de ocurrir, la toma de medidas preventivas por parte de los órganos de salud del Estado.

El caso de "smog" que primero atrajo la atención de los autores ocurrió en el transcurso de los días 7 a 8 de octubre de 1975. Presentó la característica importante de producirse en un lugar reducido (en los alrededores de la Sede Central del Servicio Meteorológico de Cuba) y debido principalmente a las características de la topografía del terreno.

Observando la Fig. 1 veremos un esquema de la Bahía de La Habana, donde se muestran las curvas de nivel y las chimeneas de las centrales termoelectricas de La Habana y Regla. Estas chimeneas tienen una altura aproximada de 50 m y están situadas al nivel del mar, mientras que la Sede Central del Servicio Meteorológico está situada en Casablanca, en una elevación de 50 m sobre el nivel del mar. Aquí podían ser consideradas también otras chimeneas emisoras de SO_2 de los alrededores, que tienen una altura similar a la dicha para las dos fuentes consideradas principales.

Desde la noche del día 7 hasta el amanecer del día 8 de octubre de 1975 los trabajadores de guardia nocturna notaron gran disminución en la visibilidad, ardor en los ojos y fuerte olor a compuesto de azufre. Una investigación operativa realizada en la mañana del día 8 demostró la pre-

sencia de un "smog" durante la noche y que él mismo sólo había afectado la Sede Central y algunos lugares próximos que se encontraban a la misma altura sobre el nivel del mar, pero que en el resto de la Ciudad no se habían presentado afectaciones.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Tomando las observaciones horarias de la estación Casablanca, ubicada en la Sede, pudo recogerse el cambio de las variables meteorológicas desde las 17:00 horas del día 7 hasta las 10:00 horas del día 8 (hora local). En la Fig. 2 se muestran los gráficos de los cambios en la rapidez del viento, la humedad relativa, y el déficit de saturación, señalando en ellos el período de calma del viento. En esta figura podemos ver que el período de calma comenzó a las 06:00 horas y se prolongó hasta las 08:00 horas del día 8. Mientras ésto ocurría, la temperatura se mantenía aproximadamente constante, reduciendo su valor de 25 a 24°C. La visibilidad se mantuvo constante en 8 km hasta las 06:00 horas, cuando se redujo a 1 km. Este cambio brusco nos hizo pensar que a esa hora fue cuando el "smog" se presentó con toda su fuerza. Entre las 04:00 y las 05:00 horas la presión tomó valores mínimos de 1 011,3 mb. La tensión de vapor alcanzó valores mínimos entre las 06:00 y las 07:00 horas.

El punto de rocío también alcanzó un mínimo entre las 06:00 y las 07:00 horas. La nubosidad fue de 1/8 hasta las 05:00 horas, comenzando a aumentar hasta 3/8 a las 06:00-07:00 horas. La tendencia de la presión fue negativa a las 04:00 horas y positiva a las 07:00 horas. Basados en la brusca disminución de la visibilidad y en una encuesta realizada, determinamos como mejor hora de ocurrencia del "smog" las 06:00 horas. La Tabla 1 muestra los datos de las variables en nuestro caso y los datos publicados de algunos valores de variables meteorológicas durante la ocurrencia de "smog", en Los Angeles y Londres.

TABLA 1. Datos sobre los parámetros meteorológicos en el momento de producirse el "smog" de La Habana, y valores de las mismas variables para los "smogs" de Londres y Los Angeles.

Parámetro	La Habana	Los Angeles	Londres
Velocidad del viento (km/h)	0	10	0
Temperatura del aire (°C)	23	24 a 32	-1 a 4
Humedad relativa (%)	95	70	85 (+niebla)
Visibilidad (km)	1	0,8 a 1,6	$30 \cdot 10^{-3}$
Presión (mb)	1 011,3		
Tensión de vapor de agua	19,8	—	
Déficit de saturación	1,1		
Punto de rocío	22		
Nubosidad	3/8		

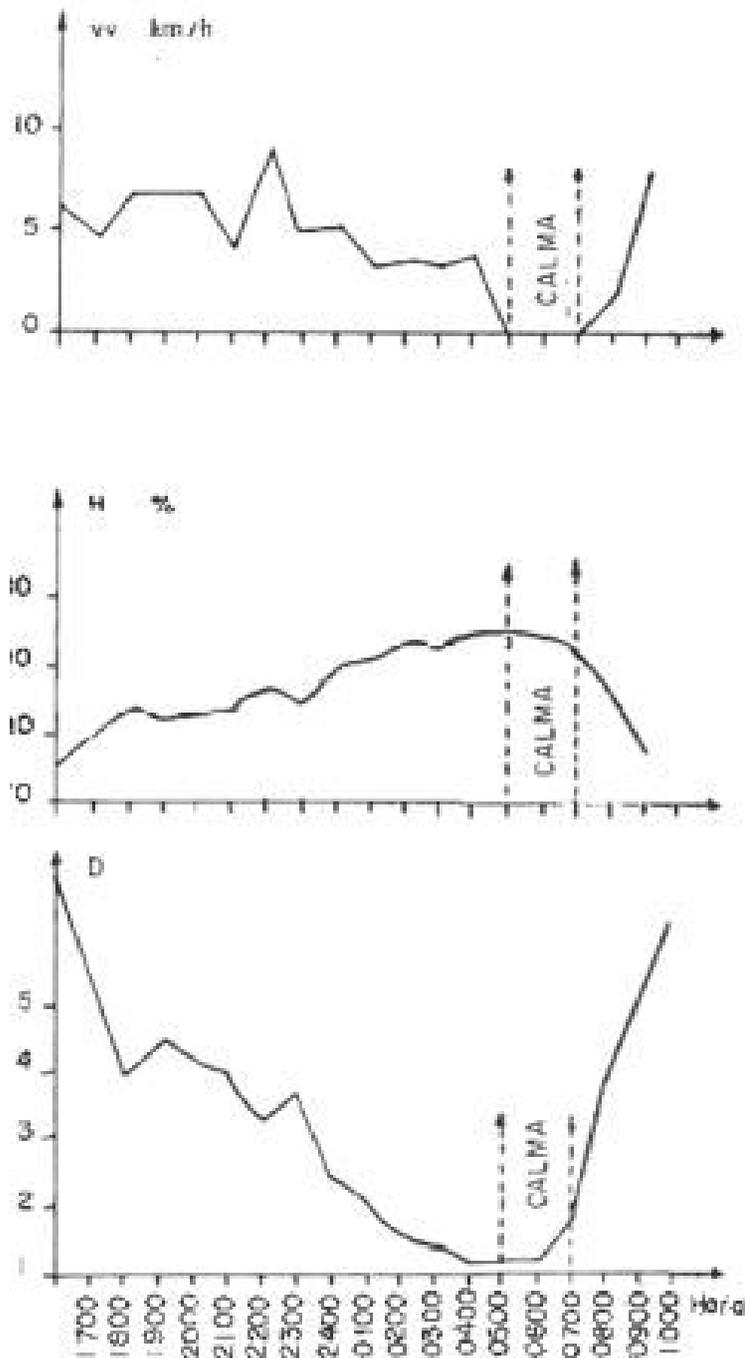


FIG. 2. Cambios en la rapidez del viento, la humedad relativa, y el déficit de saturación, en la Estación Casablanca, desde las 1700 horas del día 7 hasta las 1000 horas del día 8 de octubre de 1975.

Analizados los resultados de la corrosión aparecida en ventanas y puertas de los edificios de la Sede Central, se concluyó que por la unión del dióxido de azufre y el agua en la atmósfera se formó un ácido de azufre que reaccionó con el plomo (Pb) contenido en la pintura que recubría las partes de madera de las instalaciones. La reacción química supuesta fue:



Los resultados de esta reacción pueden verse en la Lám. v, que presenta ampliaciones fotográficas del estado en que quedó una ventana recién pintada, después del "smog".

3. CORRELACIÓN ENTRE LA HUMEDAD RELATIVA Y EL DÉFICIT DE SATURACIÓN BAJO CONDICIONES DE "SMOG" EN LA CIUDAD DE LA HABANA

Conociendo lo anteriormente expuesto, se extrajo una muestra aleatoria de días con ocurrencia de "smog" y separando información de 14 variables se encontró que entre dos de ellas (la humedad relativa H y el déficit de saturación D) aparentemente existía una relación funcional determinada a partir del diagrama de dispersión de los datos que se da en la Fig. 3. De acuerdo con la estructura de la nube de datos, tratemos de ajustar un modelo lineal de la forma conocida

$$H_i = B_0 + B_1 D_i + e_i,$$

donde los estimadores mínimo-cuadráticos B_0^* y B_1^* de los parámetros B_0 y B_1 , respectivamente, se calculan mediante las fórmulas

$$B_1^* = \frac{\sum_i D_i H_i - (1/n) (\sum_i D_i) (\sum_i H_i)}{\sum_i D_i^2 - (1/n) (\sum_i D_i)^2}$$

$$B_0^* = \bar{H} - B_1^* \bar{D}.$$

En nuestro caso los estadígrafos adquieren los valores

$$B_1^* = -3,613 \qquad B_0^* = 99,258$$

resultando la ecuación de regresión

$$H^* = 99,258 - 3,613D,$$

El coeficiente de determinación

$$R^2 = \frac{\sum_i (H_i^* - \bar{H})^2}{\sum_i (H_i - \bar{H})^2}$$

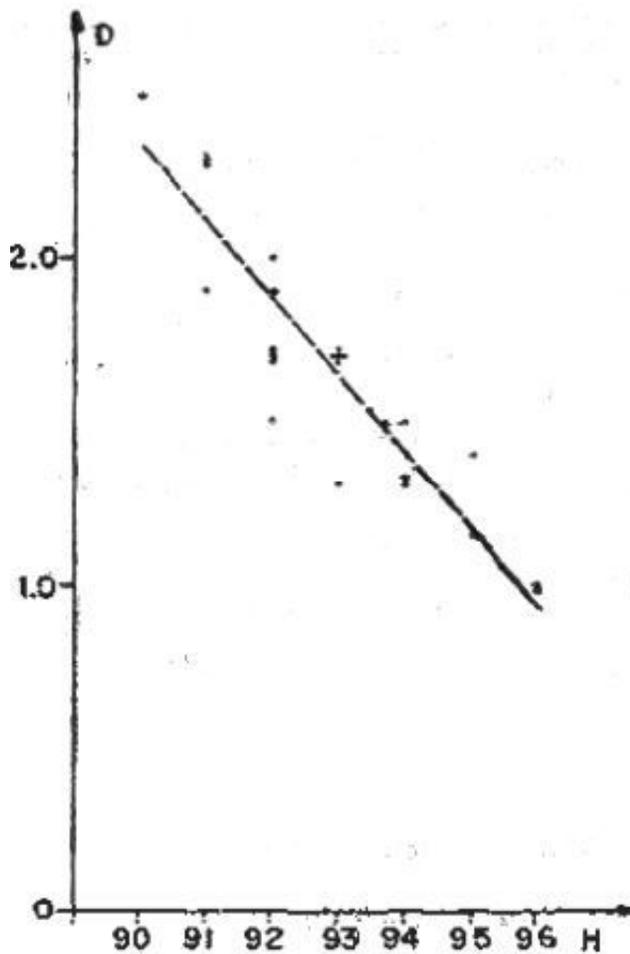


FIG. 3. Diagrama de dispersión de los datos de humedad relativa y déficit de saturación para la muestra.

adquiere en nuestro caso el valor

$$R^2 = 0,743 ,$$

indicándonos que mediante el modelo lineal ajustado se explica más del 74% de la correlación existente entre las variables en cuestión.

Para la utilización de la dócima marginal:

H_0 : el parámetro B_i no es significativo ($B_i = 0$)

H_1 : el parámetro B_i es significativo ($B_i \neq 0$)

necesitamos estimar la varianza σ^2 del modelo lineal mediante la expresión

$$S^2 = \frac{\sum_i (H_i - H_i^*)^2}{n - p - 1}$$

donde n es el tamaño de la muestra y p es el número de variables independientes. En nuestro caso tenemos

$$n = 25, \quad p = 1, \quad S^2 = 0,702, \quad S = 0,838.$$

El estadígrafo de esta dócima viene dado por

$$t_i = \frac{B_i^* - B_i}{S \sqrt{a_{i+1,i+1}}}$$

que se distribuye según una ley t de Student con $n - p - 1$ grados de libertad, resultando

$$a_{1,1} = \frac{\sum_i D_i^2}{n \sum_i D_i^2 - (\sum_i D_i)^2} \quad a_{2,2} = \frac{n}{n \sum_i D_i^2 - (\sum_i D_i)^2}$$

en el caso de la regresión simple para dociimar los parámetros B_0 y B_1 , respectivamente. Los valores de $a_{1,1}$ y $a_{2,2}$ son:

$$a_{1,1} = 0,826 \quad a_{2,2} = 0,262$$

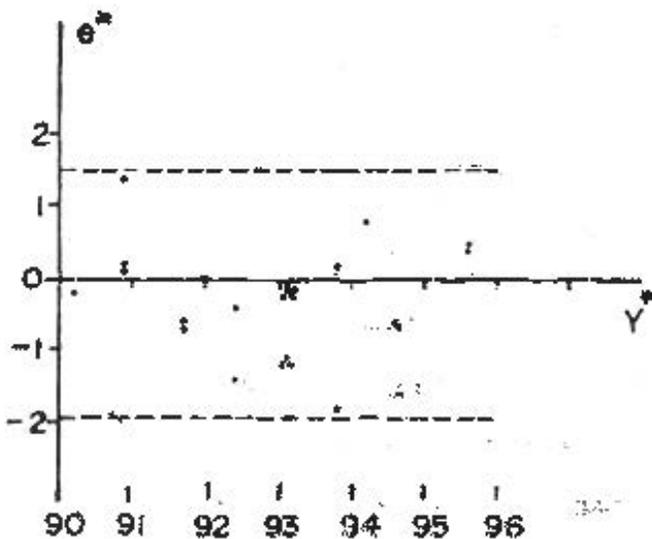


FIG. 4. Análisis de residuos para la correlación entre H y D bajo condiciones de "smog".

y los valores de los estadígrafos t_0 y t_1 (bajo H_0) resultan ser:

$$t_0 = \frac{B_0^*}{S \sqrt{a_{1,1}}} = 130,326 \quad t_1 = \frac{B_1^*}{S \sqrt{a_{2,2}}} = -8,423 .$$

Tomando un nivel de significación $\alpha = 5\%$ y observando el valor crítico $t_{21,0,975} = 2,08$ de la tabla de la distribución de Student, la regla de decisión rechaza ampliamente H_0 en ambos casos, verificándose que la recta no pasa por el origen y que el ajuste realizado es bueno, lo cual está ya justificado aparentemente por el alto valor del coeficiente de correlación lineal ($R = -0,862$) y por la estructura del gráfico correspondiente al análisis de residuos (Fig. 4), donde puede verse que la nube de puntos se ubica dentro de una banda horizontal, lo cual corresponde a un buen ajuste (QUENOUILLE, 1966).

4. NIVELES SIGNIFICATIVOS DE LA RAPIDEZ DEL VIENTO Y DE LA HUMEDAD RELATIVA BAJO CONDICIONES DE "SMOG" EN LA CIUDAD DE LA HABANA

Tomando las 290 observaciones de déficit de saturación D (mm), cada una de las cuales corresponde a un determinado nivel de humedad relativa H (%) y a un determinado nivel de la rapidez del viento V (km/h), se elaboró un modelo de análisis de varianza con una observación por casilla, que se muestra en la Tabla 2. En dicha tabla experimental la observación que aparece en cada casilla es la media de los valores de D que corresponde a la estratificación de los tres niveles de H y de los tres niveles de V que se indican.

TABLA 2. Modelo ANOVA de clasificación doble con una observación por casilla para el déficit de saturación D (mm), bajo condiciones de "smog" en La Habana. Se adjuntan los valores medios de D por filas (\bar{f}) y por columnas (\bar{c}).

		V (km/h)			\bar{f}
		0-2	3-4	5-6	
H (%)	88-90	2,35	2,53	2,45	2,44
	91-92	1,83	1,92	1,88	1,88
	93-95	1,29	1,31	1,25	1,28
	\bar{c}	1,82	1,92	1,86	

TABLA 3. Tabla ANOVA correspondiente al modelo de clasificación doble con una observación por casilla.

Causa de la variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F
por filas (f)	$SC_f = 2,018$	2	$CM_f = 1,009$	$F_f = \frac{CM_f}{CME} = 403,6$
por columnas (c)	$SC_c = 0,014$	2	$CM_c = 0,007$	$F_c = \frac{CM_c}{CME} = 2,8$
por residuo (e)	$SC_e = 0,010$	4	$CME = 0,0025$	
TOTAL	SCT = 2,042	8		

La descomposición de la suma de cuadrados total (SCT) para la obtención de los estadígrafos de Fisher F_f (filas) y F_c (columnas) de la décima de significación:

H_0 : Todos los niveles (de H) (de V) son significativamente iguales entre sí;

H_1 : No todos los niveles (de H) (de V) son significativamente iguales entre sí;

se obtiene cuando el esquema abreviado de cálculo dado en la tabla ANOVA (EHRENFELD y LITTAUER, 1964) correspondiente a este modelo es la siguiente:

Bajo un 5% de nivel de significación se tienen entonces los resultados:

$$F_f = 403,6 \quad 6,95 = F_{2,4,0,95}$$

$$F_c = 2,8 \quad 6,95 = F_{2,4,0,95}$$

donde $F_{2,4,0,95}$ es el valor de la abscisa crítica de la distribución de Fisher para los grados de libertad y probabilidad que se indican. Existen entonces diferencias significativas entre niveles de la humedad relativa con respecto a la variable de clasificación déficit de saturación, bajo condiciones de "smog", no aportando información de interés la estratificación

relativa del viento. La aplicación de la d6cima de comparaci6n m6ltiple de Tukey por contraste entre diferencia de medias (LERCH, 1967),

$$H_0: \mu_i - \mu_j = 0$$

$$H_1: \mu_i - \mu_j \neq 0$$

permite determinar si existen o no diferencias significativas entre los niveles i y j de humedad relativa bajo condiciones de "smog", efectuándose las agrupaciones significativas correspondientes. El estadígrafo T de esta d6cima viene dado por la cantidad (bajo un nivel de significaci6n $\alpha = 5\%$):

$$T = S \cdot R_\alpha(m, (m-1)(n-1))$$

donde m es el n6mero de filas y n el n6mero de columnas, $S = \sqrt{CME/n}$ y $R_\alpha(m, (m-1)(n-1))$ es la abscisa crítica de la distribuci6n de gama de Student con los grados de libertad que se indican.

En nuestro caso T adquiere el valor

$$T = 0,007$$

y pasamos a realizar los contrastes:

$$|f_1 - f_2| = 0,56 > T; |f_1 - f_3| = 0,16 > T; |f_2 - f_3| = 0,60 > T$$

verificándose que todos los niveles de humedad relativa difieren significativamente entre s3 con respecto al d6ficit de saturaci6n, bajo condiciones de "smog".

5. CONCLUSIONES

- Existe una correlaci6n lineal significativa entre las variables humedad relativa y d6ficit de saturaci6n bajo condiciones de "smog", explicando la ecuaci6n de regresi6n

$$H^* = 99,258 - 3,613D$$

más del 74% de la correlaci6n existente entre dichas variables.

- El "smog" en la Ciudad de La Habana puede ocurrir independientemente de los valores pequeños de la rapidez del viento (0 a 6 km/h) en intervalos de humedad relativa desde el 88 hasta el 95%, variando el d6ficit de saturaci6n entre 1,25 y 2,53 mm (valores medios).

REFERENCIAS

DIXON, W. J., y MASSEY, F. J. (1965): *Introducci6n al análisis estadístico*. Instituto Cubano del Libro, 489 pp.

- EHRENFELD, A., y LITTAUER, S. B. (1964): *Introduction to statistical methods*. Edición Revolucionaria, Instituto del Libro, 533 pp.
- FORSDYKE, A. G. (1970): Meteorological factors in air pollution. *WMO*, TP 153, Ginebra, 74:1-32.
- LERCH, G. (1967): *La experimentación en las ciencias biológicas y agrícolas*. Editorial Ciencia y Técnica, Instituto Cubano del Libro, 452 pp.
- Mc CORMICK, R. A. (1970): Meteorological aspects of air pollution in urban and industrial districts. *WMO*, TP 139, Ginebra, 251:1-62.
- MEADE, P. J. (1959): Smogs in Britain and the associated weather. *Air Water Pollut. Int.*, 5:2-87.
- QUENOUILLE, M. H. (1966): *Introductory statistics*. John Wiley, Londres, 216 pp.
- SUZUKI, S. (1972): *Current problems in photochemical smog in Japan*. Proceedings of International Symposium on Air Pollution, Tokio, Oct. 17-19, pp. 377-418.

RELATIVE HUMIDITY, SATURATION DEFICIT, AND SMALL VALUES
OF WIND SPEED IN THE FORMATION OF SMOGS IN HAVANA CITY

ABSTRACT

A study based on a set of observations taken at the Casablanca station, Havana City, Cuba, reveals that there is a close linear relation between relative humidity and saturation deficit under smog conditions. Furthermore, taking saturation deficit as a classification variable, a two-way classification model with one observation per cell is given in order to analyze the combined effect of relative humidity and small values of wind speed under smog conditions. Finally, conclusions and recommendations are given.