

El dióxido de nitrógeno (NO₂) troposférico en diferentes sistemas meteorológicos en dos localidades de la Cd. de La Habana

OSVALDO CUESTA SANTOS

Instituto de Meteorología de la Academia de Ciencias de Cuba, Cuba

ARMANDO CABRERA FACENDA

Instituto Nacional de Higiene, Epidemiología y Microbiología del Ministerio de Salud Pública de Cuba, Cuba

(Manuscrito recibido 1 de junio, 1992; aceptado en forma final 26 de octubre, 1992)

RESUMEN

Los problemas relacionados con los efectos ecológicos que producen los contaminantes gaseosos son de creciente preocupación general y en particular el NO₂ que está vinculado a la formación de las lluvias ácidas, así como a múltiples reacciones con los gases de efecto de invernadero.

Este trabajo refleja la influencia de diversos factores meteorológicos y geográficos sobre el NO₂ troposférico en dos localidades de la Ciudad de La Habana, analizado a través de algunas variables y sistemas meteorológicos durante el periodo de 1985 a 1988.

ABSTRACT

Problems related with ecological effects produced by gaseous pollutants are of growing general concern preoccupation, and particularly the NO₂ that is related to acid rain formation, and also to several reactions with the greenhouse effect gases. This paper reflects the influence of various meteorological and geographical systems during the period of 1985-1988.

Introducción

La contribución del NO₂ al aire contaminado en las ciudades es significativa ya que en concentraciones relativamente bajas pueden causar efectos nocivos sobre la salud humana, suprimen el crecimiento de la vegetación y aceleran la corrosión de los metales. Las fuentes antropogénicas de los óxidos de nitrógeno están asociadas a los procesos de combustión a altas temperaturas (termoeléctricas, refinerías de petróleo, el transporte automotor, así como el consumo doméstico de combustible (Logan, 1983)).

El efecto natural sobre la dispersión, transformación y remoción de contaminantes en una ciudad, es sumamente complejo debido a los múltiples factores que influyen, como son las variables meteorológicas de forma individual, velocidad y dirección del viento, temperatura, humedad y radiación o el efecto de las diversas masas de aire que se diferencian por su origen y trayectorias y por lo tanto la composición y distribución de los gases y aerosoles, van a depender de todos estos factores.

El presente trabajo analiza la influencia de estas variables y algunos sistemas meteorológicos en las localidades de Casablanca y Centro Habana sobre el dióxido de nitrógeno troposférico medido de forma diaria desde 1985 a 1988.

Materiales y métodos

El primer punto de muestreo se localiza en la periferia noreste de la Ciudad de La Habana en la localidad de Casablanca a unos 50 metros sobre el nivel medio del mar y a unos 4 km de la costa. Esta estación pertenece al Departamento de Control de la Contaminación atmosférica del Instituto de Meteorología de la ACC. Como se aprecia en la Figura 1 las fuentes del NO_2 tienen un origen antropogénico muy marcado en el sector sur por la presencia de una zona industrial y residencial, mientras que en el semicírculo norte predomina la influencia oceánica con algunas pequeñas fuentes locales, debido al transporte automotor y sectores de viviendas.

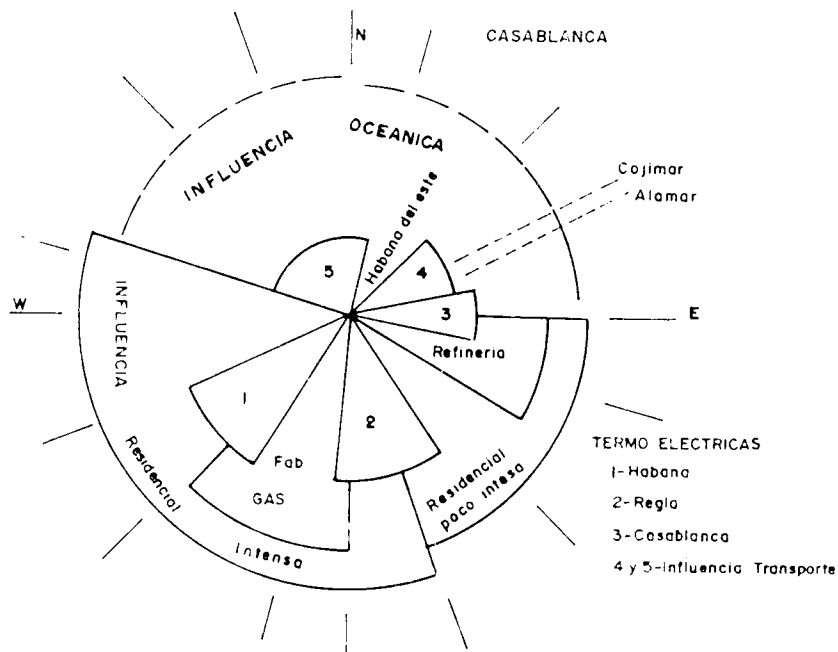


Fig. 1. Zonación de la influencia de las fuentes contaminantes (Casablanca).

El otro punto de muestreo está ubicado en una de las zonas urbanas más contaminadas de la Ciudad de La Habana (Barceló *et al.*, 1983), situada en Infanta y Crucero (Centro Habana) a 3 metros sobre el suelo y a 2.5 metros aproximadamente de la zona de tránsito, y pertenece a la Red Aire Cuba del Ministerio de Salud Pública (Estación Habana 1). En la Figura 2 podemos observar las fuentes principales que influyen sobre esta zona, en el sector comprendido desde el NE al SE se encuentran las principales fuentes industriales, y el resto se encuentra bajo la influencia del sector residencial y pequeñas fuentes industriales; como factor constante y de gran peso se encuentran las fuentes del transporte vehicular.

El método empleado para la determinación del NO_2 en las muestras diarias fue el de los tubos de absorción (Volberg, 1983; Cuesta *et al.*, 1986) y el método tradicional de Saltzman en las estaciones de Casablanca y Habana 1, respectivamente. Para la identificación de los tipos de situaciones sinópticas estudiadas se consultaron los mapas de superficie y aire superior, así como los resúmenes de temporadas invernales del Departamento de Pronóstico del Instituto de Meteorología de la Academia de Ciencias de Cuba (ACC) y fueron los frentes fríos, hondonadas, ondas tropicales y tormentas del periodo comprendido de 1985 a 1988; además se analizaron las variables meteorológicas asociadas a las concentraciones diarias de NO_2 .

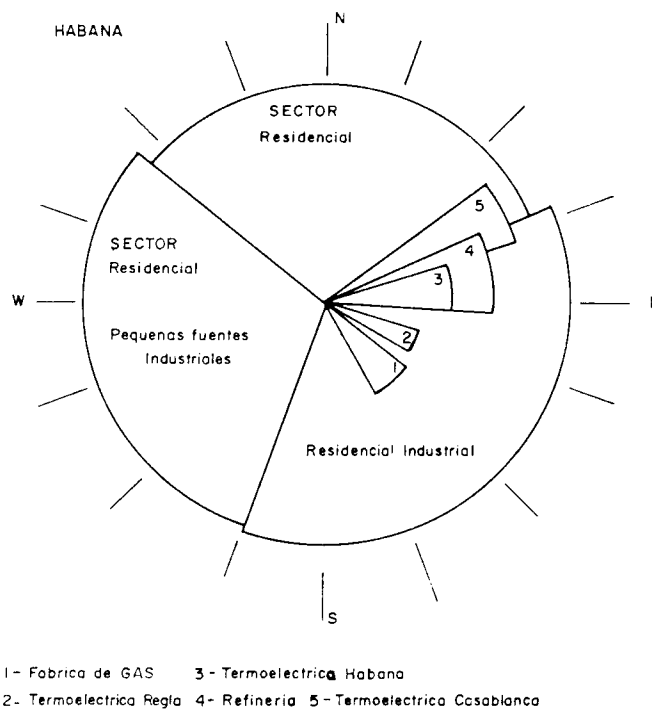


Fig. 2. Zonalización de la influencia de las fuentes contaminantes (Habana 1).

Los resultados experimentales obtenidos se compararon mediante el análisis de varianza de clasificación simple, para lo cual los resultados de la comparación del valor F experimental con la función de distribución de Fisher con un nivel de significación de 0,05 y 0,01; al igual que el análisis de la t de student, para ver la posibilidad de admisión de la hipótesis de la igualdad de las medias (Dixon y Massey, 1972), así como la técnica de correlaciones lineales entre el NO₂ y las variables meteorológicas (Ostle, 1981).

Para la confección de las rosas de concentraciones se emplearon las indicaciones al respecto planteadas por la Organización Mundial de la Salud (O. M. S., 1980), ya que estas rosas son comúnmente utilizadas para la detección e identificación de las fuentes emisoras.

Todos los datos utilizados fueron procesados utilizando el paquete de programas Microstat en una microcomputadora personal LTEL.

Discusión de los resultados

La distribución de frecuencia acumulada de las concentraciones de NO₂ en las estaciones de Casablanca y Habana 1 se muestran en las Figuras 3 y 4. Casablanca por su ubicación recibe concentraciones menores, comparada con la otra localidad urbana y esto es debido fundamentalmente al régimen predominante del viento que evita el arrastre directo de las impurezas desde las fuentes cercanas, excepto cuando se produce una fuerte acumulación por la calma prolongada o la persistencia de vientos de componente sur durante la afectación de algunos sistemas meteorológicos que producen concentraciones relativamente altas, comparadas con el valor medio registrado en esta estación. Alrededor del 20% de las concentraciones están por encima de 5,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y el 0,4% de los casos están por encima de la concentración máxima admisible que es de 40,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

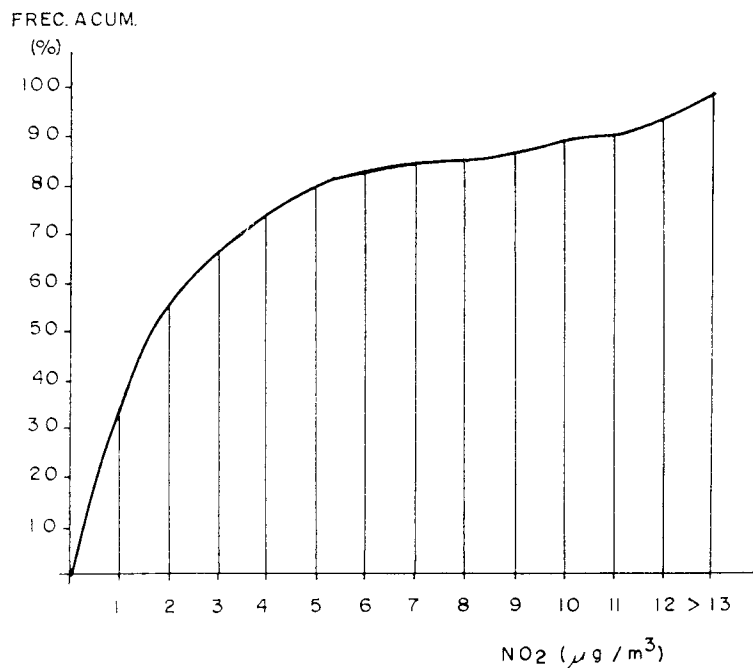


Fig. 3. Distribución de frecuencia acumulada del NO₂ para el punto de muestreo *Casablanca*. (1985-1988).

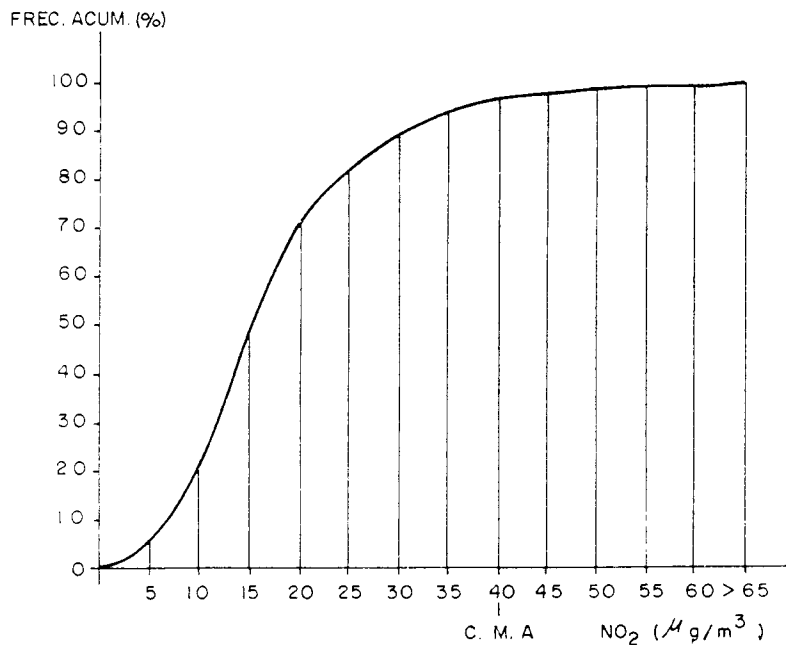


Fig. 4. Distribución de frecuencia acumulada del NO₂ para el punto de muestreo *Habana 1*. (1985-1988).

El predominio del arrastre del aire desde el sector norte y este, provoca que alrededor del 50% de las concentraciones de NO₂ sean iguales o menores a 2,0 μg/m³, que es el valor promedio reportado en diversos estudios realizados en Europa y Estados Unidos en localidades remotas (Altshuller, 1986) y este valor también coincide con los hallados en la Florida y en Panamá que representan fuerte influencia marina (Lodge *et al.*, 1974) que es la situación que se presenta en Casablanca.

En la localidad de la estación Habana 1 se presentan las concentraciones más altas dentro de la Ciudad de La Habana, en la distribución de frecuencia acumulada observamos que el 3,4% de los casos están por encima de la concentración máxima admisible y en general más del 95% de las concentraciones están por encima de $5,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, por lo que la contribución de las fuentes industriales y del transporte se hace sentir fuertemente en esta estación.

La variación anual de las concentraciones medias diarias del NO₂ se observan en las Figuras 5 y 6, así como las bandas de confianza para el 98 y 95% de la bondad de ajuste para los puntos de muestreo de Casablanca y Habana 1, respectivamente.

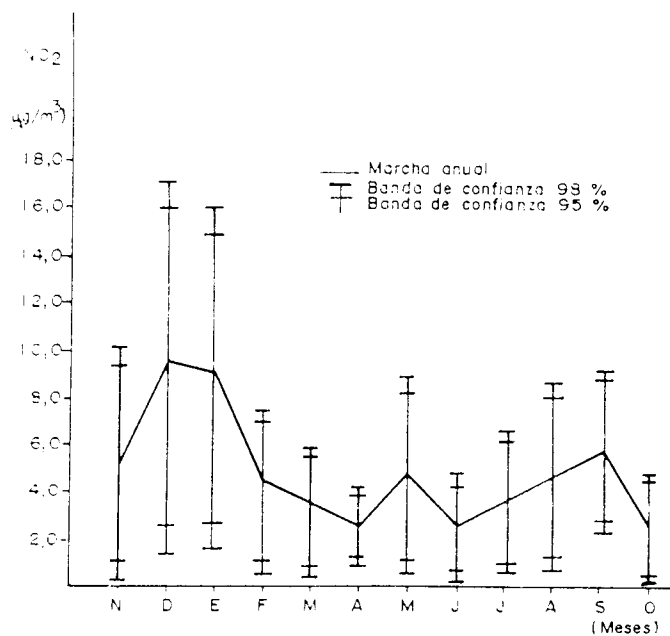


Fig. 5. Marcha anual de las concentraciones medias diarias del NO₂ para Casablanca.

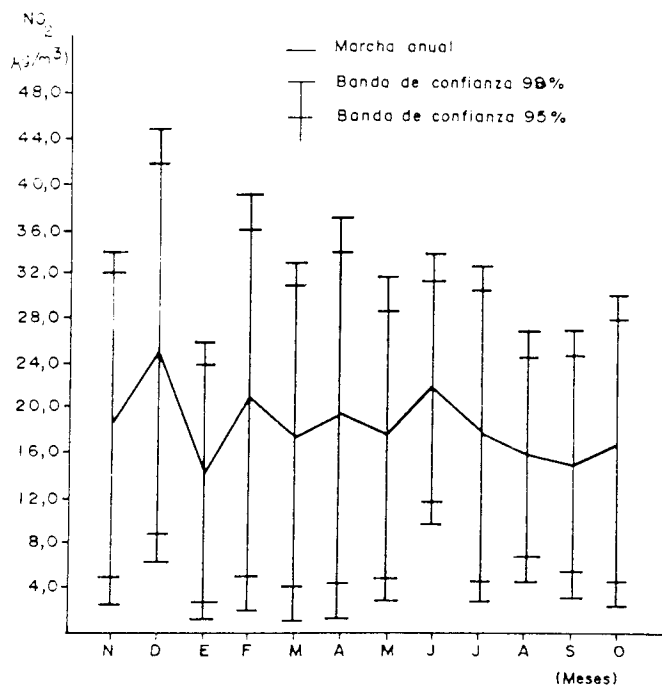


Fig. 6. Marcha anual de las concentraciones medias diarias del NO₂ para la estación Habana 1. (Centro Habana).

Para Casablanca vemos que el valor mínimo medio absoluto ocurre en el mes de abril. Este mínimo está vinculado a un máximo relativo de radiación global y a la presencia de una masa anticiclónica rica en ozono que favorece la destrucción fotoquímica del NO₂ (Ramírez, 1989; Cuesta, 1988). Otros meses de mínimos notables son junio y octubre, lo cual en Casablanca está asociado a los meses más lluviosos del año y es conocido el efecto de lavado que las precipitaciones ejercen sobre los gases y aerosoles atmosféricos (Junge, 1963).

Por otro lado los máximos ocurren en diciembre y enero y lo asociamos a la ocurrencia de los vientos de componente sur que preceden a la entrada de los frentes fríos que provocan altas concentraciones al transportar el aire contaminado desde la parte industrial y residencial de la ciudad.

Al comparar el periodo poco lluvioso (noviembre-abril) y lluvioso (mayo-octubre), verificamos que el primero presenta concentraciones mayores (Tabla 1) coincidiendo esto con los resultados hallados por otros autores (Martin and Barber, 1981; Ferm, 1982) para países de clima subtropical como para localidades urbanas y rurales.

Tabla 1. Valores de las concentraciones diarias de NO₂ en µg/m³ y las variables meteorológicas asociadas, por periodos en los puntos de muestreo.

Periodo	Estadística	NO ₂ -1	NO ₂ -2	ff (km/h)	tt (°C)	e (mb)	Hr (%)	ins. (hs)	Rad. Glob. Mj/m ²
Poco lluvioso	Media	5,3	18,7	19,7	23,2	16,7	78	7,7	16,85
	Des. ST.	4,5	9,8	6,7	2,3	3,0	8,8	3,2	6,33
	Max.	105,0	317,0	42,0	28,3	23,0	94	12,9	30,30
Lluvioso	Media	3,8	17,0	14,8	26,7	21,0	81	8,4	20,80
	Des. ST	3,4	9,3	6,1	1,4	5,9	5,8	3,1	5,90
	Max.	82,6	55,2	41,3	29,8	25,6	91	13,0	30,92
Total	Media	4,6	18,5	17,1	24,9	18,8	79	8,0	18,41
	Des. ST.	4,0	9,4	6,9	2,5	3,3	7,2	3,1	6,5
	Max.	105,0	317,0	42,0	29,8	25,6	94	13,0	30,92
N		545	483	652	654	644	653	644	616

NO₂-1 = Casablanca

NO₂-2 = Habana 1

Des. St. = Desviación estándar

hs = horas sol

En la estación Habana 1 la marcha anual presenta el mínimo absoluto en enero y otro relativo durante el mes de septiembre. Esta estación bajo la influencia directa del transporte automotor y de las múltiples fuentes de la ciudad, presenta a lo largo de todo el año una gran variación diaria en las concentraciones y sin embargo no existen diferencias entre las concentraciones al comparar los periodos poco lluvioso y lluvioso. La variable meteorológica que mayor relación presenta con la marcha anual es la fuerza del viento, y es capaz por la dispersión y dilución que produce sobre el NO₂ de justificar con bastante lógica los mínimos, así como el comportamiento durante gran parte de los meses, esto lo apreciamos en la Figura 7. Mientras que para Casablanca (Fig. 8) además de la fuerza del viento, la precipitación total por meses nos explica parte del comportamiento anual.

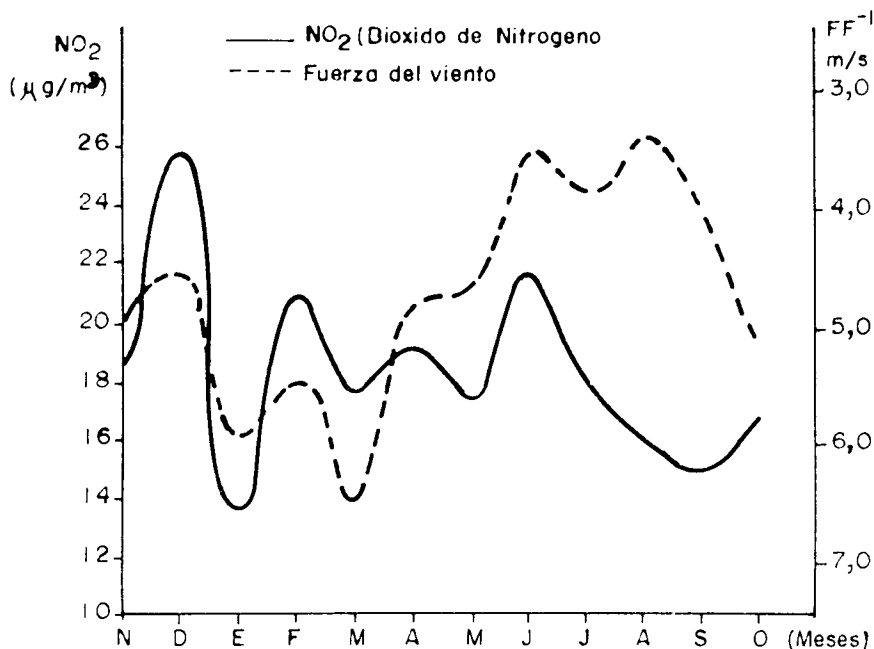


Fig. 7. Dependencia de las concentraciones de NO₂ con la fuerza del viento en *Centro Habana*.

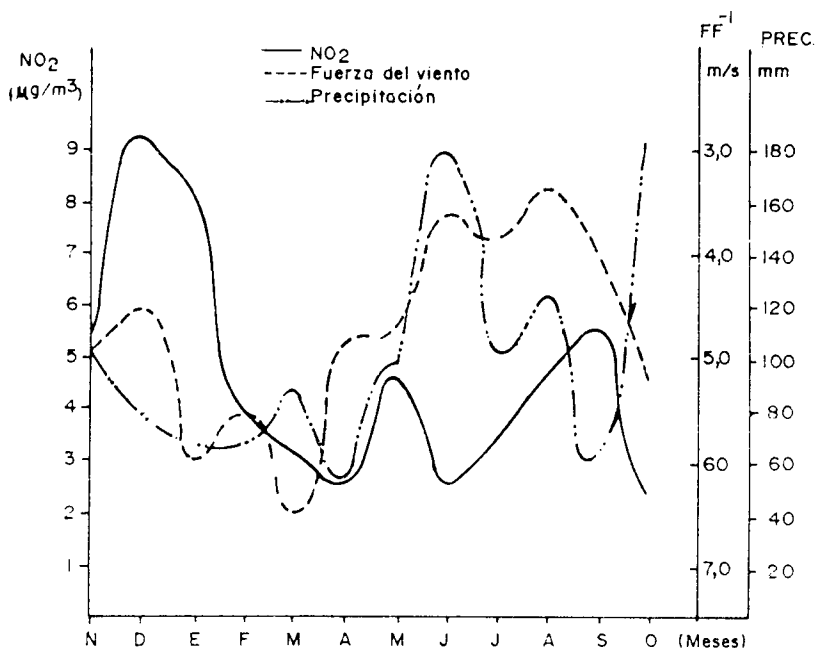


Fig. 8. Dependencia de las concentraciones de NO₂ con la fuerza del viento y las precipitaciones en *Casablanca*.

Para completar el conjunto de variables meteorológicas que influyen sobre los valores de las concentraciones del NO₂, analizamos estas relaciones a través de correlaciones lineales (Tablas 2 y 3) y hallamos que la fuerza del viento y la radiación solar son las variables que físicamente explican la disminución de las concentraciones cuando aumentan estas variables en Casablanca, mientras que en la estación Habana 1 solamente la fuerza del viento tiene correlación lineal significativa.

Tabla 2. Correlaciones lineales del NO₂ con algunas variables meteorológicas en el punto de muestreo de Casablanca.

Variable	Correlaciones lineales con el NO ₂		
	Periodo lluvioso	Periodo poco lluvioso	Periodo total
Fuerza del viento	-0,2222	-0,2225	-0,1710
Temperatura seca	-0,0645	-0,0569	-0,1069
Tensión del vapor	0,0148	0,0113	-0,0443
Humedad relativa	0,0705	0,1416	0,1128
Insolación	-0,2033	-0,0464	-0,1103
Radiación global	-0,1486	-0,1771	-0,1814
Valor crítico			
(1-cola, 0,05)=+0-	0,1112	0,1161	0,0845
(2-cola, 0,05)=+/-	0,1323	0,1381	0,1006
	n=220	n=202	n=380

Tabla 3. Correlaciones lineales del NO₂ con algunas variables meteorológicas en el punto de muestreo de Centro Habana.

Variable	Correlaciones lineales con el NO ₂		
	Periodo lluvioso	Periodo poco lluvioso	Periodo total
Fuerza del viento	-0,3014	-0,1476	-0,1270
Temperatura seca	-0,1194	-0,0418	-0,0312
Tensión del vapor	0,0271	0,0658	-0,0001
Humedad relativa	0,1515	0,0643	0,0558
Insolación	-0,1272	0,0062	-0,0298
Radiación global	-0,1274	-0,0003	-0,0727
Valor crítico			
(1-cola, 0,05)=+0-	0,1136	0,1161	0,0768
(2-cola, 0,05)=+/-	0,1351	0,1381	0,0915
	n=211	n=202	n=460

La rosa de concentración para Casablanca muestra (Fig. 9) que los rumbos de componentes (WNW, NW y NNW) presentan los valores de concentraciones menores, lo cual es reflejo de la influencia del sector marino, el sector desde el norte hasta el ENE con concentraciones un poco mayores reflejan la influencia del transporte automotor y pequeños barrios residenciales, mientras que para el rumbo este y la parte sur, la influencia de las fuentes de la ciudad se reflejan en los valores obtenidos de NO₂. La frecuencia de ocurrencia es mayor en los rumbos E, ENE, NNE y el por ciento de días en los cuales no se puede determinar un rumbo predominante según

los criterios de la Organización Mundial de la Salud se definió como variable y obedece a la situación costera de nuestra ciudad que refleja, de forma marcada durante gran parte del año, el establecimiento del sistema de brisa y terral que durante parte de la noche y primera de la mañana, manifiesta la brisa de tierra y arrastra las impurezas desde la ciudad hasta nuestro punto de medición.

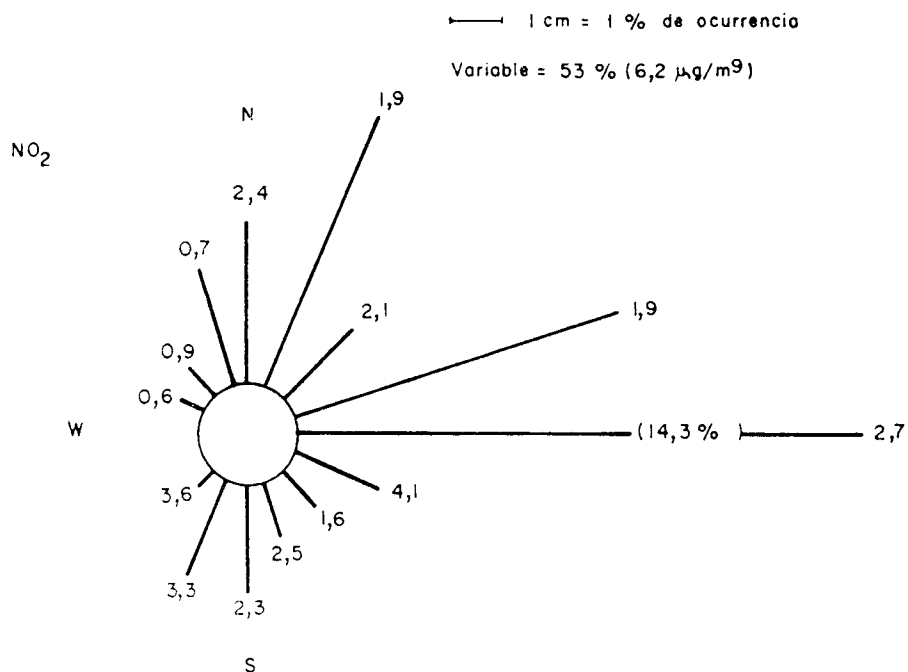


Fig. 9. Rosa de concentraciones para Casablanca.

Para la estación Habana 1 la rosa de concentración (Fig. 10) refleja que casi todos los rumbos reciben de forma bastante uniforme las concentraciones producidas por el transporte automotor y en los rumbos del E y ESE y del S y SSE, al no existir fuentes locales fuertes, el nivel de las concentraciones de NO₂ se produce por la fuente anteriormente señalada. En los rumbos

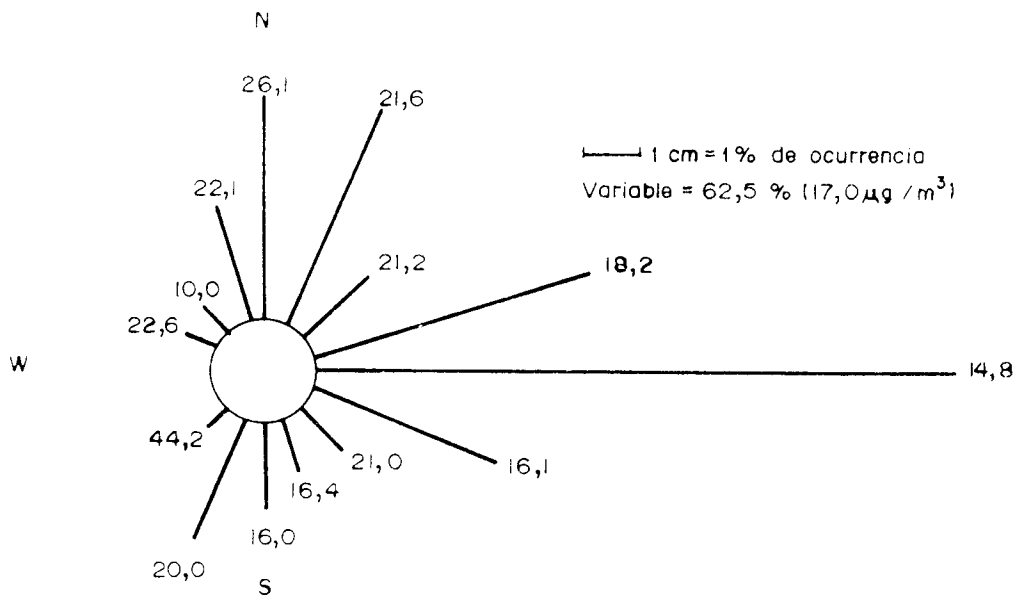


Fig. 10. Rosa de concentraciones para Centro Habana.

desde el NNW al NE las fuentes principales del sector industrial producen un incremento de las concentraciones. El valor del rumbo SW (44,2) se debe a la presencia de una pequeña industria, pero debido a la poca frecuencia de ocurrencia de este rumbo su repercusión se minimiza.

Sistemas sinópticos: Frente frío

Los valores de las concentraciones medias diarias del dióxido de nitrógeno, días antes y después de la entrada de los frentes fríos en las tres temporadas invernales que comprenden el periodo de tiempo estudiado en las estaciones de Casablanca y Habana 1, aparecen reflejados en las Figuras 11 y 12. En total se analizaron 43 frentes fríos en ambas estaciones.

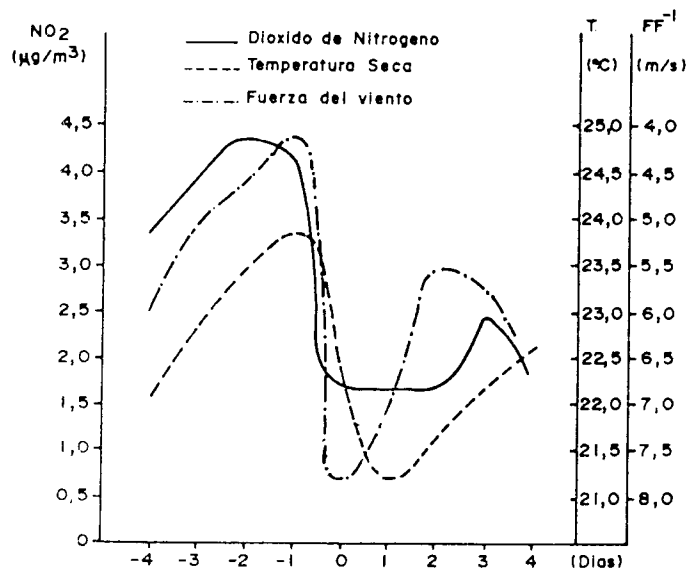


Fig. 11. Valores de las concentraciones de NO₂ días antes y después de la entrada de los frentes fríos. Casablanca.

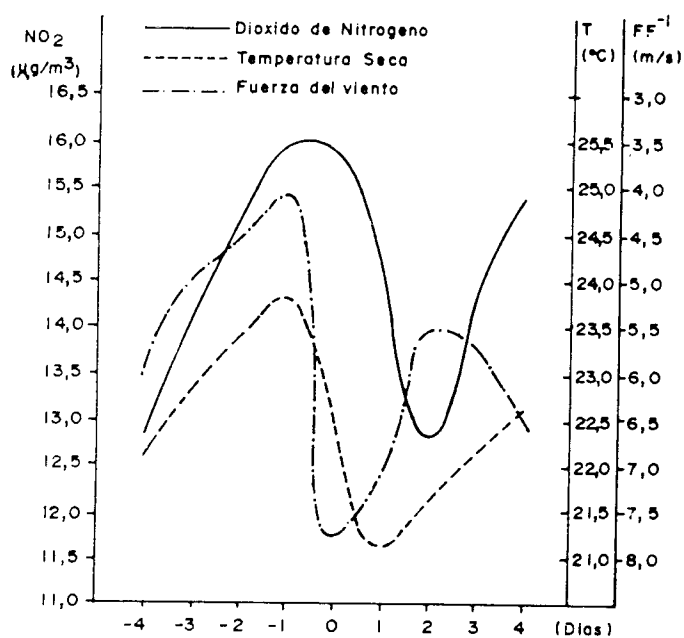


Fig. 12. Valores de las concentraciones de NO₂ días antes y después de la entrada de los frentes fríos. Centro Habana.

En Casablanca encontramos un comportamiento muy similar al hallado por la estación de muestreo de La Palma, Pinar del Río, Cuba (Cuesta, 1989); la subida de las concentraciones durante los días antes de penetrar el frente se debe a la masa de aire tropical marino que presenta altas temperaturas y a la disminución de la fuerza del viento, también al aumento de la humedad y la nubosidad que provocan el aumento de la actividad biológica de los suelos y la disminución de la función fotoquímica de la radiación solar sobre el NO₂ y además al arrastre desde la ciudad, de este contaminante, por lo que es notable la diferencia entre las concentraciones en la localidad rural de La Palma, alejada de fuentes contaminantes, donde se asume que la mayor parte de las concentraciones tienen origen natural (actividad biológica de los suelos, oxidación del amoníaco y descargas eléctricas, entre otras) y las halladas para Casablanca con influencia urbana. Los valores reportados para La Palma antes de la entrada de los frentes fríos, oscila entre 1,3 y 1,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Mientras que el valor medio histórico de esa estación de muestreo rural es 1,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tras la entrada del frente frío por lo general se produce un fuerte proceso de remoción húmeda (Washout) de los gases y aerosoles presentes en la troposfera baja, debido a las precipitaciones que acompañan al sistema frontal, lo que produce una disminución de las concentraciones de NO₂ a partir de la entrada del frente. En las variables meteorológicas también se producen los cambios típicos para este fenómeno.

La disminución de las concentraciones de NO₂ se deben a múltiples factores, entre ellos al cambio de la dirección del viento que comienza a soplar de la región norte y produce un cese de la influencia de la ciudad, para dar paso a una masa de aire continental frío y con mayor intensidad de la fuerza del viento que produce un aumento de la dispersión, además es conocido que esta masa continental es rica en ozono (Altshuller, 1986; Ramírez, 1989), lo que provoca bajo las condiciones anticiclónicas de cielo despejado, una gran actividad fotoquímica con la consecuente destrucción del NO₂.

En el caso de la estación Habana 1 también encontramos que días antes de la entrada del frente, las concentraciones suben y se debe a la disminución de la fuerza del viento. Con la entrada de los frentes comienza una disminución gradual de las concentraciones de NO₂, no de forma brusca como Casablanca, al parecer porque en este punto, dentro de la ciudad la compleja estructura de las edificaciones dificulta la dispersión y el mínimo se alcanza durante el segundo día y después comienza un nuevo ascenso de las concentraciones que se corresponde con la disminución de la fuerza del viento.

En ambas estaciones durante la influencia de los frentes fríos, las concentraciones están por debajo de los valores medios reportados para el periodo poco lluvioso (durante el cual se presentan los frentes fríos), lo cual confirma que este sistema sinóptico produce un efecto de fuerte dispersión sobre el NO₂.

Ondas tropicales

La proximidad de una onda tropical en los puntos estudiados se manifiesta con divergencia en los niveles bajos, lo que implica cielo despejado y un aumento de la radiación solar y de la fuerza del viento, estas condiciones favorecen la destrucción fotoquímica de los óxidos de nitrógeno y a la dispersión. El característico desplazamiento de las ondas por nuestro territorio lleva hacia Casablanca una masa de aire marino procedente del NE, por lo tanto las concentraciones tendrán menos influencia de la ciudad y esto se aprecia en la Tabla 4 donde los valores reportados son menores comparados con el promedio histórico para el periodo lluvioso (3,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Tabla 4. Valores de las concentraciones diarias de NO₂ asociados a la ocurrencia de ondas tropicales, hondonadas y tormentas en el punto de muestreo de Casablanca.

Sistema meteorológico	Ocurrencia	\bar{X}	D.S. \bar{X}	MIN.	MAX.
Ondas tropicales n=20	Día antes	2,9	1,1	0,2	12,9
	Día	3,0	1,4	0,2	15,9
	Día después	3,1	1,2	0,2	15,9
Hondonadas n=33	Día antes	2,0	1,7	0,2	7,5
	Día	2,1	1,9	0,1	7,5
	Día después	2,4	1,9	0,1	7,3
Tormentas n=47	Día antes	2,4	1,9	0,3	8,1
	Día	4,2	3,8	0,2	18,0
	Día después	2,8	2,4	0,2	9,2

\bar{X} = Media aritmética D. S. \bar{X} = Desviación estándar

Durante y después del paso de una onda tropical aumenta la nubosidad, la humedad y la actividad eléctrica y disminuye la fuerza del viento, la unión de estos factores favorece el incremento del contenido de NO₂ en la troposfera, como se aprecia en la tabla anteriormente mencionada.

En el caso del punto de muestreo Habana 1 (Tabla 5) ocurre el mismo fenómeno explicado anteriormente, pero el día después del paso de la onda al establecerse un flujo del SE (no existen fuentes industriales fuertes) y por los efectos de limpieza provocados por la lluvia sobre esta localidad con gran contenido de NO₂ de origen antropogénico se produce una disminución de las concentraciones.

Tabla 5. Valores de las concentraciones diarias de NO₂ asociados a la ocurrencia de ondas tropicales, hondonadas y tormentas en el punto de muestreo de Centro Habana (Habana 1).

Sistema meteorológico	Ocurrencia	\bar{X}	D. S. \bar{X}	MIN.	MAX.
Ondas tropicales n=27	Día antes	15,7	7,4	2,5	33,5
	Día	16,3	9,2	2,5	52,7
	Día después	15,7	7,7	1,9	33,3
Hondonadas n=34	Día antes	20,9	13,9	0,1	61,2
	Día	23,6	13,1	1,9	61,2
	Día después	20,5	13,9	1,9	61,2
Tormentas n=50	Día Antes	19,7	11,4	3,9	61,2
	Día	20,0	8,4	1,9	48,7
	Día después	17,0	8,6	1,9	37,4

\bar{X} = Media aritmética D. S. \bar{X} = Desviación estándar

Hondonadas

En las Tablas 4 y 5 mencionadas anteriormente aparecen los valores asociados a las hondonadas. El tipo de hondonada estudiada es el resultado de la prolongación de las ondas de los oestes de las latitudes medias, este tipo de sistema meteorológico se caracteriza por el poco movimiento y su influencia sobre nuestras localidades de estudio se hace sentir mediante una masa de aire anticiclónica de origen continental que atraviesa el Golfo de México con vientos del oeste o noroeste.

Para Casablanca este sistema sinóptico presentó bajos valores promedios de concentraciones de NO₂ en las muestras diarias. Si los comparamos con el valor medio en este punto, estos bajos valores se justifican por la procedencia de la masa de aire del cuarto cuadrante que para este punto carece de fuentes antrópicas.

Por otro lado vemos que para el punto de muestreo (Habana 1) la influencia de las hondonadas provocan un efecto contrario, en lo referente a las concentraciones, aquí se manifiestan valores mayores de concentraciones de NO₂ al comparar los valores medios obtenidos; en primer lugar el arrastre del viento del cuarto cuadrante provoca mayor influencia de un sector de la ciudad, densamente poblado y con algunas industrias cercanas, además de ser característicos la disminución de la fuerza del viento y el aumento de la nubosidad provocando menor dispersión y destrucción fotoquímica de NO₂.

Tormentas

Los días de ocurrencia de tormentas en nuestras dos zonas de estudio presentan la característica de que la fuerza del viento disminuye y como ambos reflejan en sus concentraciones de diversas formas la presencia de las fuentes urbanas; el posible aporte de óxidos de nitrógeno producto de las descargas eléctricas (Liu *et al.*, 1983 y Drapcho *et al.*, 1983) resultará enmascarado dentro de las concentraciones halladas. Además otro factor que debe incrementar los valores de NO₂ es la presencia de las inversiones de temperatura que ocurren después de producirse la precipitación que acompaña a las tormentas, las que impiden que se produzca una buena dispersión del NO₂.

En ambas estaciones, el día antes y después de ocurrir la tormenta se diferencia del día de ocurrencia de la tormenta y este valor está por encima del valor promedio hallado para sus respectivos puntos de muestreo.

Al comparar los diferentes sistemas meteorológicos respecto a las concentraciones promedios halladas para Casablanca y Habana 1 encontramos como se muestra en la Tabla 6, que durante la influencia de los frentes fríos las concentraciones de NO₂, son menores comparados con todos los valores promedios de los periodos poco lluvioso, lluvioso y total, lo que nos indica que la masa fría

Tabla 6. Comparación de los valores medios de las concentraciones de NO₂ de los sistemas meteorológicos en los periodos lluvioso, poco lluvioso y total.

Sistema meteorológico	Casablanca	Habana 1 (Centro Habana)
Frentes fríos	<PPLL-PLL-PT	<PPLL-PLL-PT
Ondas tropicales	=PPLL-PLL-PT	=PPLL-PLL-PT
Hondonadas	<PPLL-PLL-PT	>PPLL-PLL-PT
Tormentas	=PPLL-PLL-PT	=PPLL-PLL-PT

PPLL = Periodo poco lluvioso PLL = Periodo lluvioso PT = Periodo total

que precede la entrada de los frentes se caracteriza por la fuerte dispersión que produce del NO_2 en ambas estaciones, además que su composición original de NO_2 está fuertemente relacionada con la actividad fotoquímica que modifica significativamente sus características durante los días despejados.

Las ondas tropicales y las tormentas en ambos puntos presentan concentraciones similares a las promedios característicos de todos los periodos estudiados, por lo tanto no se diferencian significativamente de las concentraciones que caracterizan a estas estaciones. Las hondonadas presentan un comportamiento diferente en ambas estaciones debido a su ubicación con respecto a la forma de influir este sistema, como ya se mencionó anteriormente.

Para Casablanca, las concentraciones de NO_2 para las hondonadas es menor que la concentración media, mientras que para el punto Habana 1 es mayor.

Por último realizamos la comparación de los sistemas meteorológicos según las concentraciones características de NO_2 en cada uno de ellos entre sí (Tabla 7), lo cual nos da la posibilidad de conocer en qué grado influye cada sistema sobre nuestro punto de estudio, así como explicar en muchos casos el origen de este contaminante.

Tabla 7. Comparación de los valores medios de las concentraciones de NO_2 de los sistemas meteorológicos entre sí en los puntos de muestreo.

Casablanca		Habana 1	
Tormentas	>Hondonadas	Tormentas	=Hondonadas
Tormentas	=Ondas tropicales	Tormentas	>Ondas tropicales
Tormentas	>Frentes fríos	Tormentas	>Frentes fríos
Hondonadas	=Ondas tropicales	Hondonadas	>Ondas tropicales
Hondonadas	=Frentes fríos	Hondonadas	>Frentes fríos
Ondas tropicales	>Frentes fríos	Ondas tropicales	=Frentes fríos

En Casablanca las tormentas presentan mayores concentraciones de NO_2 que en los frentes fríos y las hondonadas, y no se diferencian de las ondas tropicales; en el punto Habana 1, las tormentas presentan mayores concentraciones que las ondas tropicales y los frentes fríos y no se diferencian de las hondonadas.

Las hondonadas, en Casablanca no se diferencian de los frentes ni de las ondas tropicales, sin embargo en la estación Habana 1 son mayores.

Al comparar las ondas tropicales con los frentes, hallamos que en Casablanca son mayores las concentraciones de las ondas y en la estación Habana 1 no se diferencian estos sistemas sinópticos.

Conclusiones

- 1) Alrededor del 50% de los valores de las concentraciones de NO_2 registradas en Casablanca se pueden catalogar como propias de una localidad sin influencia antropogénica. Para la estación Habana 1 la distribución de las concentraciones siempre reflejan la influencia de la ciudad.
- 2) La concentración máxima admisible es superada en un 0,4 y 3,4% en las estaciones de Casablanca y Habana 1 respectivamente.
- 3) Las variables meteorológicas que presentan correlación lineal significativa con las concentraciones medias diarias de NO_2 , son la fuerza del viento y la radiación global en Casablanca y la fuerza del viento en la estación Habana 1.

- 4) Las rosas de contaminación reflejan los valores de las concentraciones según los sectores de influencia de origen industrial y marino en ambas estaciones.
- 5) Al paso de los frentes fríos por las localidades estudiadas se produjo una disminución de las concentraciones de NO₂ hasta después del segundo y tercer día de su afectación, siendo estas concentraciones inferiores a la media del periodo poco lluvioso.
- 6) Al paso de las ondas tropicales los valores de las concentraciones disminuyen con respecto a los promedios hallados en ambas estaciones durante el tiempo estudiado.
- 7) Las hondonadas sobre Casablanca producen valores de concentraciones de NO₂ más bajos que la media total del periodo estudiado, mientras que en la estación Habana 1 ocurre lo contrario. Esto es debido a la ubicación respecto a las fuentes de la ciudad.
- 8) Durante la ocurrencia de las tormentas se observaron aumentos de los valores del NO₂ respecto a la media encontrada en ambas estaciones.
- 9) Al comparar los sistemas meteorológicos entre sí, logramos obtener un criterio más adecuado para diferenciar la influencia de las masas de aire que afectan a los puntos de muestreo.

Reconocimientos

Queremos expresar nuestro agradecimiento a los trabajadores del Departamento de Control de la Contaminación Atmosférica del Instituto de Meteorología de la ACC y del Instituto Nacional de Higiene, Epidemiología y Microbiología del MINSAP, que hicieron posible el muestreo del NO₂ en las dos estaciones analizadas.

REFERENCIAS

- Altshuller, A. P., 1986. The rule of the nitrogen oxides in nonurban ozone formation in the planetary layer over N American, W Europe and adjacent areas of ocean. *Atmos. Environ.*, Vol. 20, No. 2, 245-268.
- Barceló, C., A. Cabrera y F. Inclán, 1983. Contaminación atmosférica. Fluctuaciones horarias de variables horométricas en Centro Habana. *Revista Ciencias Químicas*, 14(2), 242-263.
- Cuesta, O., M. González, J. Castillo y L. Mora, 1986. Determinación de los óxidos de nitrógeno en la troposfera de Cuba utilizando la técnica de los tubos de absorción. Presentado I Conferencia Científica de Meteorología, IIM, La Habana, Cuba.
- Cuesta, O. y H. Font, 1988. Algunos resultados de las concentraciones para el nivel regional del NO₂ troposférico en Cuba. Presentado VII Jornada Científica del Insmet, ACC.
- Cuesta, O., 1989. Incidencia de factores meteorológicos y geográficos en el NO₂ troposférico en una localidad rural. Presentado I Simposio Internacional de Ciencias Geográficas, La Habana, Cuba.
- Dixon, W. y F. Massey, 1972. Introducción al análisis estadístico. 2a. Edición. Ediciones Revolucionarias, Instituto Cubano del Libro.
- Drapcho, D. L., D. Sisterson y R. Kumar, 1983. Nitrogen fixation by lightning activity in a thunderstorm. *Atmos. Environ.* Vol. 17(4), 729-734.
- Ferm, M., 1982. Method for determination of gaseous nitric acid and particulate nitrate. *EMEP*, Genova, 10-12.
- Junge, C., 1963. Air chemistry and radioactivity. Academic Press, New York.

- Liu, S. C., M. Mc Farland, O Zafiriou, y B. Huebert, 1983. Tropospheric NO_x and O_3 budgets in the Equatorial Pacific. *J. Geophys. Res.*, **88**, No. 2, 1360-1368.
- Lodge, J., P. Machado, J. Pate, D. Sheesley y A. Martburg, 1974. Atmospheric trace chemistry in the American humid tropics. *Tellus*, **26**, 250-253.
- Logan, Jenifer, 1983. Nitrogen oxides in the troposphere: Global and regional budgets. *J. Geophys. Res.*, **88**, No. C15, 10785-10807.
- Martin, A. y F. Berber, 1981. Sulfur dioxide, oxides of nitrogen and ozone measured continuously for two year at a rural site. *Atmos. Environ.* **15**, 567-576.
- Ostle, B, 1981. Estadística Aplicada. Editorial Científico Técnico, La Habana.
- Ramírez, J., 1989. Estudio de las variaciones de las concentraciones del ozono troposférico en Cuba y su vinculación con algunos fenómenos meteorológicos. Tesis para la obtención del grado científico de candidato a Ciencias Geográficas, Instituto de Meteorología, ACC.
- Volberg, H. Sh., 1982. Instrucciones metodológicas provisionales para el análisis químico del aire atmosférico para la técnica de los tubos de absorción. (En ruso). Leningrado, Comité Estatal de Hidrometeorología.
- O. M. S., 1980. Analyzing and interpretating air monitoring data. GEMS (Global Environmental Monitoring System) offset publication No. 51. Geneva.