

Caracterización de las concentraciones de los compuestos gaseosos del nitrógeno atmosférico asociados a diversos Tipos de Situaciones Sinópticas (TSS) en la estación La Palma, Pinar del Río, Cuba

Characterization of the concentrations of gaseous atmospheric nitrogen compounds associated with various Types of Synoptic Situations (TSS) at La Palma's station, Pinar del Río, Cuba

Mariam Fonseca Hernández

mariam.fonseca@jinsmet.cu

Centro de Contaminación y Química Atmosférica. Instituto de Meteorología. Apartado 17032, Habana 17, C.P. 11 700, Ciudad Habana, Cuba.

Fax: (537) 866 8010

Oswaldo Cuesta Santos

osvaldo.cuesta@jinsmet.cu

Recibido: noviembre 29, 2011; aceptado: abril 9, 2012

Resumen

Se analizaron las concentraciones de los principales compuestos gaseosos del nitrógeno atmosférico en la estación regional La Palma (en Pinar del Río, Cuba) y se correlacionaron estas con los principales tipos de situaciones sinópticas (TSS). Se observó que los valores de concentraciones medidos son similares a los encontrados a nivel regional en otras partes del mundo, así como se encontraron estadísticamente los TSS que influyen de manera significativa en las concentraciones de los compuestos estudiados; el NH_3 resultó el único que no presenta diferencias significativas.

PALABRAS CLAVE: Nitrógeno, compuestos de nitrógeno, óxidos de nitrógeno, situaciones sinópticas.

Abstract

Concentrations of major gaseous nitrogen compounds measured at the regional station: La Palma in Pinar del Rio were analyzed and were also correlated with the main Types of Synoptic Situations (TSS). It was observed that measured concentration values are similar to those reported at a regional level in other parts of the world. Besides, the most signifi-

cantly influential TSS on all studied, but NH_3 , nitrogen compound concentrations were obtained. NH_3 was found to be the only nitrogen compound, which does not present significant differences.

KEYWORDS: Nitrogen, nitrogen compounds, nitrogen oxides, synoptic situations.

Introducción

El estudio del comportamiento de los principales compuestos del ciclo atmosférico del nitrógeno es de vital importancia para aquellos trabajos orientados a la protección de la calidad del aire, y se comporta como una vertiente sobresaliente en el amparo del medio ambiente.

Los contaminantes atmosféricos están cambiando la composición físico-química de la atmósfera, de manera que incluso pueden modificar el clima, las cuales repercuten, además, en el funcionamiento y la estructura de los ecosistemas naturales y seminaturales por sus efectos sobre las especies endémicas de animales y plantas, así como en la salud humana.

El presente trabajo aborda las características de las concentraciones de los principales compuestos gaseosos del nitrógeno atmosférico, como el NO_2 , NO y

NH₃, y su relación con los tipos de situaciones sinópticas, lo cual condiciona en gran medida la región de origen de estos contaminantes. El estudio abarca el período 1986–2008, en la estación regional La Palma (Pinar del Río, Cuba) y se hace referencia a los posibles impactos potenciales que sobre el medio ambiente pueden provocar estos contaminantes.

Materiales y métodos

La estación de muestreo seleccionada fue la estación meteorológica La Palma, localizada en los 22°46' de latitud norte y los 83°33' longitud oeste (Fig. 1.1), a una altura de 47,39 m sobre el nivel del mar. Es una zona rural con influencia de la vegetación, en especial, de amplios pinares sobre los sectores este y sur, donde se encuentra ubicada gran parte de la Sierra del Rosario; sobre los sectores norte y oeste se hallan cultivos de caña de azúcar y otras labranzas menores, y luego se localiza la zona costera, aproximadamente a 6 km.

El terreno va cambiando, desde llano y bajo en la costa, hasta levemente ondulado en las inmediaciones de la estación; además, se localiza a 3 km al este del pueblo que lleva el mismo nombre. La zona cuenta con una sola fuente fija de emisión potente, la cual es un central azucarero (central Sanguily) ubicado al NE de la estación, y las fuentes de contaminantes

predominantes son la microbacteriana y la quema de biomasa.

La captación del NO₂ se realizó mediante el procedimiento de los tubos de absorción (Volberg, 1982; Cuesta *et al.*, 1995; W.M.O., 1986), el cual es recomendado por la OMM para el muestreo en lugares remotos. El proceso de toma del NO₂ está minuciosamente explicado en el *Manual para la operación de la Red de Control de la Contaminación Atmosférica*, preparado por el Departamento de Control de la Contaminación Atmosférica del Instituto de Meteorología de la Academia de Ciencias de Cuba. El monóxido de nitrógeno (NO) fue determinado con el método de Griess-Saltzman y el amoníaco (NH₃) con el procedimiento de la técnica de Indofenol de Harwood y Khun (1970), aunque adicionándole a la muestra el reactivo Nessler como desarrollador de color.

La información meteorológica de esta estación se extrajo de los archivos del Centro del Clima del INSMET, y su validación fue realizada acorde con las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 1990). La categorización de los tipos de situaciones sinópticas para el período estudiado se realizó según la clasificación utilizada por Lapinel (1988) y efectuada en conjunto por especialistas del Centro del Clima, del Centro de Física de la Atmósfera, y del Centro de Química y Contaminación del Instituto de Meteorología de Cuba (INSMET). Para la comparación de medias se utilizaron varios métodos. Con vistas a comparar si la medias de los compuestos gaseosos del nitrógeno atmosférico en el período lluvioso (LL) y poco lluvioso (PLL) son estadísticamente diferentes se utilizó el método de Sheffé, el cual es uno de los más rigurosos y, a la vez, de los de más fácil aplicación; para su utilización se toma el valor de la tabla de Fisher.

Con el objetivo de comparar las medias tomadas dos a dos se calcula, para cada par, el estadígrafo siguiente:

$$F_{ij\text{exp}} = \frac{(\bar{x}_i - \bar{x}_j)^2 (n_i \cdot n_j)}{S_D^2(n)}$$

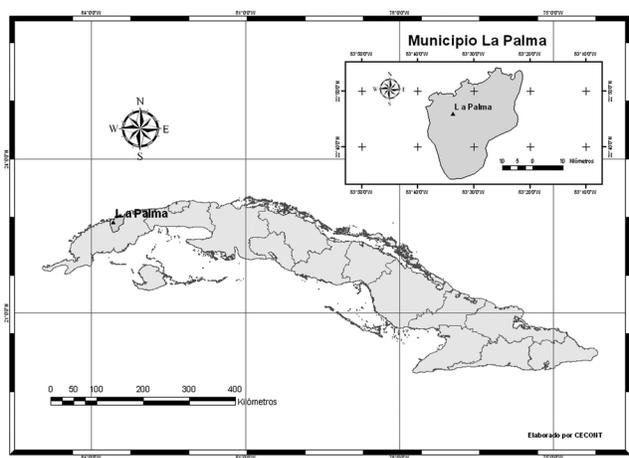


Figura 1.1. Ubicación geográfica general y local de la Estación La Palma, Cuba.

Donde: \bar{x}_i y \bar{x}_j son los valores de las medias de los grupos i y j (períodos LL y PLL, respectivamente); n_i y n_j representan la cantidad de determinaciones de los grupos i y j , respectivamente; S_b^2 es la varianza producida por las desviaciones dentro de los grupos y n es la cantidad de datos total (n_i+n_j).

El valor de se compara con:

$$L(\alpha) = F(\alpha, f_1, f_2) (k-1)$$

Donde: α es el nivel de significación (0.05); f_1 y f_2 son los grados de libertad ($n-1$) de cada grupo, respectivamente y k es la cantidad de grupos (2).

Para la comparación estadística de las medias de los principales compuestos del nitrógeno atmosférico asociados con los TSS se utilizó el análisis de varianza que, como método, permitiría decidir si la dependencia de los valores informados de las concentraciones y los TSS está dada por el azar o si, realmente, existe diferencia entre estos. Puesto que en el cálculo de varianzas entre y dentro de los grupos hay varios pasos, se acostumbra representar al grupo completo de resultados en una tabla conocida como tabla de análisis de varianza (ANOVA) (Tabla 1.1), la cual incluye las fuentes de variación, las sumas de los cuadrados (las variaciones), los grados de libertad, las varianzas (los cuadrados medios) y el valor estadístico de prueba F_0 , que es la distribución F de Fisher basada en la razón de dos varianzas.

Análisis y discusión de los resultados

Características de las concentraciones de los principales compuestos de nitrógeno atmosférico

El exceso de nitrógeno constituye un problema que se enlaza con el conjunto de los principales sectores de la sociedad y se interpone en la influencia directa o indirecta que estos tienen en los problemas medioambientales que inquietan a Cuba y el mundo. Las investigaciones vinculadas con la contaminación atmosférica se ejecutan en tres niveles (asociados, principalmente, con las diferentes escalas de los procesos meteorológicos): el nivel de impacto o local, el nivel global o de fondo y el nivel regional, ligado al medio rural donde la actividad antropogénica es reducida y, por tanto, las concentraciones de las impurezas son menores. Este último es el nivel de esta investigación, el cual resulta importante dentro de los estudios de la contaminación atmosférica.

El comportamiento de las concentraciones medias mensuales del NO_2 , el NO y el NH_3 aparecen en la figura 1.2. En cuanto al NO_2 , la estación de muestreo presenta valores acordes con su condición de estación regional, lo cual es reflejo de la no existencia de fuentes antropogénicas potentes en su cercanía, puesto que al ser una estación rural predominan las fuentes naturales, como la producción biológica de los

Tabla 1.2. Tabla de Análisis de Varianza (ANOVA)

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Estadístico
Entre grupos	$\sum_{i=1}^k n_i (\bar{y}_i - \bar{y})^2$	$k-1$	$\frac{SC_t}{k-1}$	$F_0 = \frac{S_t^2}{S_b^2}$
Dentro de los grupos	$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$	$n-k$	$SC_b / n-k$	
Total	$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y})^2$	$n-1$		ANOVA

suelos, las descargas eléctricas, la quema de biomasa entre otras (Vitousek, P. M. *et al.*, 1997; Galloway, *et al.*, 2003). Los valores medios mensuales oscilan entre 1,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 2,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, que son concentraciones similares a las informadas para regiones continentales remotas (WMO, 1987). Los valores medios mensuales encontrados de las concentraciones de NO varían entre 1,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 3,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, los cuales son similares a los hallados por Galloway y otros, en regiones tropicales, y son compatibles con la potencia de las fuentes naturales presentes en esta localidad. El NO presenta los máximos en verano, y las concentraciones de este contaminante resultan superiores sobre el continente, mientras que sobre los océanos son menores. Para el trópico, en regiones rurales, estos compuestos poseen un comportamiento similar (Galloway *et al.*, 1995). El amoníaco (NH_3), entre los principales compuestos gaseosos del nitrógeno, es el que presenta concentraciones mayores; sus valores medios oscilan entre 0,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 3,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, que son concentraciones similares a las informadas para zonas rurales de clima subtropical de los Estados Unidos y Europa (Galloway *et al.*, 1995).

Para comparar si las medias mensuales de estos compuestos en los períodos lluvioso (PLL) y poco lluvioso (PPLL) son estadísticamente diferentes se recurrió al método de Sheffé explicado. La tabla 1.2 muestra los valores utilizados para el empleo del método.

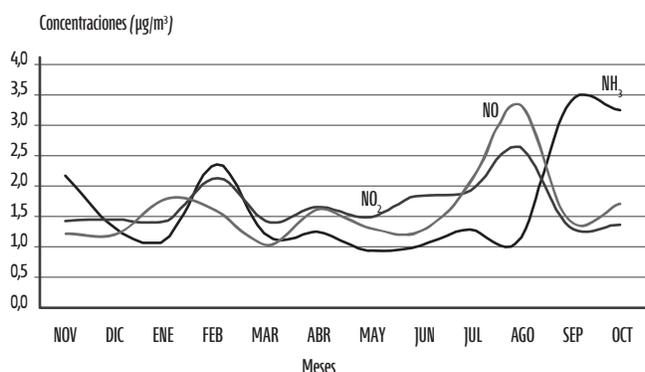


Figura 1.2: Comportamiento del NO_2 , NO y NH_3 desde 1987 al 2008 en la estación meteorológica regional La Palma, Pinar del Río, Cuba.

Planteamiento de las hipótesis

HIPÓTESIS NULA: Las concentraciones del NO_2 , NO y NH_3 son iguales en los períodos poco lluvioso y lluvioso.

$$H_0 = \bar{X}_i = \bar{X}_j$$

HIPÓTESIS ALTERNATIVA: Las concentraciones del NO_2 , NO y NH_3 no son iguales en los períodos lluvioso y poco lluvioso.

$$H_1 = \bar{X}_i \neq \bar{X}_j$$

TABLA 1.2
Estadígrafos comunes del NO_2 , NO y NH_3 en los períodos PLL y PPLL desde 1987 a 2008, expresadas en ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

NO_2	Media	n	Desvest	Varianza
Período PLL	1.7	1256	2.6	6.53
Período PPLL	1.6	1397	2.4	5.53
87-08	1.7	2653	2.4	5.82
NO	Media	n	Desviación estándar	Varianza
Período LL	1.7	766	2.6	6.76
Período PLL	1.4	841	1.9	3.58
87-08	1.4	1607	1.9	3.63
NH_3	Media	n	Desviación estándar	Varianza
Período PLL	1.6	761	3.2	10.01
Período PPLL	1.5	786	2.5	6.44
87-08	1.5	1547	2.5	6.41

Valores del estadígrafo (NO_2)

$$\begin{aligned}
 S_D^2 &= \left(\frac{(n_1-1) * S_1^2}{n-k} \right) + \left(\frac{(n_2-1) * S_2^2}{n-k} \right) \\
 &= \left(\frac{(1256-1) * 6,53}{2653-2} \right) + \left(\frac{(1397-1) * 5,53}{2653-2} \right) \\
 &= 5.9986
 \end{aligned}$$

$$F_{ij_{exp}} = (1.7 - 1.6)^2 (1256 * 1397) / 5.9986 (2653) = 1.1025$$

Siendo:

$$L(0.05) = F(0.05, 12551396) * (2-1) = 1.0946$$

Por tanto:

$$W: \{F_{ij_{exp}} < L(\alpha)\} - \{F_{ij_{exp}} < L(0,05)\} - \{F_{ij_{exp}} < 1.0946\}$$

$F_{ij_{exp}} = 1.1025 < 1.0946 \therefore$ no rechazo $H_0 \rightarrow$ lo cual indica que no existen diferencias significativas en las concentraciones de NO_2 entre los períodos lluvioso y poco lluvioso a un nivel de significancia de 95 %.

Sin embargo, en el ciclo anual se distinguen dos tendencias: una de bajas concentraciones, coincidiendo con el período poco lluvioso, dadas por el incremento de la fuerza del viento que provoca la dispersión de los contaminantes; y otra al inicio del período lluvioso, donde se incrementaron las concentraciones de NO_2 por el incremento de variables como la temperatura y la humedad relativa, que incentivan las fuentes biológicas de los suelos.

Valores del estadígrafo (NO):

$$S_D^2 - \left(\frac{(n_1-1) * S_1^2}{n-k} \right) + \left(\frac{(n_2-1) * S_2^2}{n-k} \right) \\ = \left(\frac{(766-1) * 6,76}{1607-2} \right) + \left(\frac{(841-1) * 3,58}{1607-2} \right) \\ = 5.0997$$

$$F_{ij_{exp}} = (1.7 - 1.4)^2 (766 * 841) / 5.0997 (1607) = 10.4099$$

Siendo:

$$L(0.05) = F(0.05, 765, 840) * (2-1) = 1.1232$$

Por tanto:

$$W: \{F_{ij_{exp}} < L(\alpha)\} - \{F_{ij_{exp}} < L(0.05)\} - \{F_{ij_{exp}} < 1.1232\}$$

$F_{ij_{exp}} = 10.4099 < 1.1232 \therefore$ no rechazo $H_0 \rightarrow$ lo cual indica que no existen diferencias significativas en las concentraciones de NO entre los períodos lluvioso y poco lluvioso a un nivel de significancia de 95 %.

Valores del estadígrafo (NH_3):

$$S_D^2 - \left(\frac{(n_1-1) * S_1^2}{n-k} \right) + \left(\frac{(n_2-1) * S_2^2}{n-k} \right) \\ = \left(\frac{(761-1) * 10,01}{1547-2} \right) + \left(\frac{(786-1) * 6,44}{1547-2} \right) \\ = 8.1975$$

$$F_{ij_{exp}} = (1.6 - 1.5)^2 (761 * 786) / 8.1975 (1547) = 0.8380$$

Siendo:

$$L(0.05) = F(0.05, 760, 785) * (2-1) = 1.1257$$

Por tanto:

$$W: \{F_{ij_{exp}} < L(\alpha)\} - \{F_{ij_{exp}} < L(0,05)\} - \{F_{ij_{exp}} < 1.1257\}$$

$F_{ij_{exp}} = 0.8380 < 1.1257 \therefore$ rechazo $H_0 \rightarrow$ no se rechaza H_1 , lo cual indica que existen diferencias significativas en las concentraciones de NH_3 entre los períodos lluvioso y poco lluvioso a un nivel de significancia de 95 %.

En el período lluvioso (mayo-octubre) son mayores los valores de las concentraciones de NH_3 que en el período poco lluvioso (noviembre-abril) (Tabla 1.3), a causa del incremento de la temperatura y la humedad relativa asociadas con la actividad microbacteriana de los suelos, la cual se incentiva y, por ende, se libera mayor cantidad de nitrógeno.

Tabla 1.3

Comparación de las concentraciones del NH_3 entre los períodos PLL y PPLL desde 1987 a 2008, expresadas en $\mu\text{g}/\text{m}^3$

	Media	Máximo	Desviación estándar	Mínimo	n
Período PLL	1,5	33,5	2,8	0,1	786
Período PPLL	1,6	35,9	4,5	0,1	761

Relación de las concentraciones de los principales compuestos del nitrógeno y los tipos de situaciones sinópticas

La relación entre los valores de las concentraciones de nitrógeno con las diversas masas de aire asociadas con los diferentes TSS tienen importancia para conocer el comportamiento de estos contaminantes vinculados con muchos problemas actuales de la protección del medioambiente.

Los TSS permiten asumir un criterio genético de modo que queden bien diferenciadas las influencias anticiclónicas oceánicas y continentales, los sistemas ciclónicos de origen tropical o extratropical, así como otras perturbaciones acompañadas de fuertes áreas de convergencia, que se agrupan en atención a su procedencia y origen (Lapinel, 1988); por tanto, los TSS son la clave para estudiar las características de la composición y la distribución de los contaminantes en todas sus manifestaciones (Cuesta, 1995).

Comportamiento de las concentraciones del NO₂, NO y NH₃ en los tipos de situaciones sinópticas

Para decidir si las diferencias observadas entre las medias de los diferentes TSS pueden atribuirse al azar o si existen diferencias reales, se utilizó el análisis de la varianza, con la ayuda de la tabla de análisis de varianza Anova, anteriormente explicada.

Planteamiento de las hipótesis

HIPÓTESIS NULA: Los TSS no influyen de forma significativa en las concentraciones del NO₂, NO y NH₃.

$$H_0: \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = \bar{X}_3$$

HIPÓTESIS ALTERNATIVA: Los TSS si influyen de forma significativa en las concentraciones del NO₂, NO y NH₃.

$$H_0: \text{Existe alguna } \bar{X}_i \text{ diferente}$$

Entonces:

Se rechaza H_0 a un nivel de significación $\alpha = 0.05$ (95 %), si $\frac{S_E^2}{S_D^2} > F_{1-\alpha}^{(k-1; n-k)}$

Los valores utilizados para el empleo del método se muestran en la tabla 1.4 y los valores obtenidos se presentan en la tabla 1.5.

Siendo para el NO₂:

$$F_{1-\alpha}^{(k-1; n-k)} = F_{1-0.05}^{(8-1; 2672-8)} = 2.01$$

Por tanto:

$$W: \left\{ \frac{S_E^2}{S_D^2} > F_{1-\alpha}^{(k-1; n-k)} \right\} = \left\{ \frac{S_E^2}{S_D^2} > F_{0.95}^{(7; 2664)} \right\} = \left\{ \frac{S_E^2}{S_D^2} > 2.01 \right\}$$

$F_0 = 2.63 > 2.01 \therefore$ rechazo H_0 > no se rechaza H_1 , lo cual indica que existen diferencias significativas en las concentraciones de NO₂ relacionadas con los tipos de situación sinóptica para, por lo menos, uno de estos a un nivel de significancia de 95 %.

Para determinar cuál o cuáles de los TSS son diferentes, se completó el análisis encontrando un intervalo de confianza (0.0932) y con este se hallaron los TSS con medias estadísticamente diferentes, que fueron aquellos cuyas medias no se encuentran dentro de ese intervalo. En la tabla 1.6, los TSS señalados son aquellos que influyen significativamente en las concentraciones de NO₂.

Las características de las concentraciones del NO₂ en la estación, según los tipos de situaciones sinópticas, aparecen en la tabla 1.7. De acuerdo con esta clasificación, se tiene que el TSS I (Anticiclón del Atlántico) presenta valores de NO₂ (1,9 µg/m³) por encima del valor medio hallado durante el período de estudio (1,7 µg/m³). En este caso, se encontró una correlación

Caracterización de las concentraciones de los compuestos gaseosos del nitrógeno atmosférico asociados a diversos Tipos de Situaciones Sinópticas (TSS) en la estación La Palma, Pinar del Río, Cuba

TABLA 1.4

Estadígrafos comunes del NO₂, NO y NH₃, según los TSS desde 1986 a 2008, expresados en µg/m³

TSS (NO ₂)	n	Media	Desviación estándar	Varianza
I (anticiclón del Atlántico)	301	1.9	2.9	8.7
II (anticiclón extendido)	344	1.6	2.0	3.8
III (gradiente débil)	519	1.8	3.0	8.8
IV (situaciones ciclónicas)	71	1.7	2.1	4.5
V (zonas de convergencia)	142	1.5	2.5	6.3
VI (bajas extratropicales)	99	2.4	2.9	8.4
VII (zonas frontales)	186	1.6	2.3	5.5
VIII (anticiclón migratorio)	1 010	1.5	2.1	4.6
87-08	2672	1.7	2.4	5.8
TSS (NO)	n	Media	Desviación estándar	Varianza
I (anticiclón del Atlántico)	204	1.8	2.5	6.3
II (anticiclón extendido)	200	1.7	2.0	3.9
III (gradiente débil)	311	1.4	2.4	6.0
IV (situaciones ciclónicas)	58	1.7	2.6	6.8
V (zonas de convergencia)	61	1.8	3.0	8.8
VI (bajas extratropicales)	66	2.6	3.3	10.9
VII (zonas frontales)	114	1.6	2.0	3.9
VIII (anticiclón migratorio)	612	1.3	1.9	3.5
87-08	1626	1.4	1.9	3.6
TSS (NH ₃)	n	Media	Desviación estándar	Varianza
I (anticiclón del Atlántico)	200	1.0	2.5	6.3
II (anticiclón extendido)	195	1.5	2.6	6.9
III (gradiente débil)	303	1.8	4.2	17.8
IV (situaciones ciclónicas)	58	2.2	5.3	27.8
V (zonas de convergencia)	58	1.4	2.0	4.1
VI (bajas extratropicales)	61	1.3	2.5	6.2
VII (zonas frontales)	106	1.4	2.7	7.5
VIII (anticiclón migratorio)	585	1.6	2.6	6.6
87-08	1 566	1.5	2.5	6.4

TABLA 1.5

Tabla del análisis de varianza para calcular el estadístico de prueba para el NO₂, NO y NH₃ y su relación con los TSS

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Estadístico	
NO ₂	Entre grupos	111.97	7	15.99	2.63
	Dentro de los grupos	16 156	2 664	6.06	
Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Estadístico	
NO	Entre grupos	175.89	7	25.12	5.01
	Dentro de los grupos	8122.5	1 618	5.02	
Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Estadístico	
NH ₃	Entre grupos	128.45	7	18.35	1.93
	Dentro de los grupos	14814.3	1 558	9.51	

TABLA 1.6

TSS que influyen significativamente en las concentraciones del NO₂ desde 1986 a 2008, expresadas en µg/m³

TSS	Media (µg/m ³)
I (anticiclón del Atlántico)	1.9292
II (anticiclón extendido)	1.6291
III (gradiente débil)	1.7845
IV (situaciones ciclónicas)	1.6993
V (zonas de convergencia)	1.4649
VI (bajas extratropicales)	2.3922
VII (zonas frontales)	1.6408
VIII (anticiclón migratorio)	1.5144
Intervalo de confianza	1.5749 > x > 1.7613

TABLA 1.7

Concentraciones medias del NO₂, según los TSS desde 1986 a 2008, expresadas en µg/m³

TSS	Media	Máximo	Desviación estándar	Mínimo	n
I (anticiclón del Atlántico)	1,9	28,4	2,9	0,1	301
II (anticiclón extendido)	1,6	15,0	2,0	0,1	344
III (gradiente débil)	1,8	28,7	3,0	0,1	519
IV (situaciones ciclónicas)	1,6	10,6	2,1	0,1	71
V (zonas de convergencia)	1,5	21,1	2,5	0,1	142
VI (bajas extratropicales)	2,4	20,0	2,9	0,1	99
VII (zonas frontales)	1,6	20,0	2,3	0,1	186
VIII (anticiclón migratorio)	1,5	25,9	2,1	0,1	1 010
87-08	1,7	28,7	2,4	0,1	2 653

lineal significativa con la humedad relativa (Tabla 1.8). Por otro lado, en el TSS II (Anticiclón Extendido) ($1,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$), los valores se encuentran por debajo de la media del período estudiado.

El TSS III (gradiente débil) presenta valores por encima de la media histórica. La posible explicación de estos valores puede encontrarse en el aumento de humedad relativa y la temperatura seca del aire, la disminución de la fuerza del viento (baja dispersión de los contaminantes) y el incremento de los días con tormentas eléctricas (Cuesta *et al.*, 2006; Álvarez *et al.*, 2008); todos estos factores favorecen el incremento de la actividad biológica de los suelos en este tipo de situación sinóptica.

El TSS IV (situaciones ciclónicas) ($1,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$) presenta valores por debajo de su valor histórico, lo cual se corresponde con sus características de fuerte dispersión y limpieza a causa del arrastre de las impurezas por la lluvia. Se encontró correlación lineal significativa con la presión, e inversa con la temperatura (Tabla 1.9).

El TSS V (zonas de convergencia) ($1,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) presenta valores por debajo de su media histórica, lo cual puede estar causado por los procesos de precipitaciones que limpian la atmósfera. En este caso, se halló una correlación significativa, pero inversa con la presión (Tabla 1.10)

Los TSS VII (zonas frontales) ($1,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y VIII (anticiclón continental) ($1,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) se caracterizan por presentar valores de concentraciones por debajo del promedio histórico hallado; las causas posibles de estos valores son el aumento de la dispersión por el incremento de la fuerza del viento y su procedencia de región norte, lo cual, en esta estación, es sinónimo de ausencia de fuentes emisoras cercanas. Con el TSS VIII se halló una correlación lineal significativa con la presión (Tabla 1.11).

El TSS VI (bajas extratropicales) ($2,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) presenta el mayor valor de concentración porque provoca en la zona de estudio un flujo del tercero y el cuarto cuadrantes; por tanto, la masa de aire se desplaza

sobre tierra, bien sean áreas agrícolas o urbanas, las que son fuentes de este contaminante.

TABLA 1.8

Matriz de correlación del NO_2 en el TSS I y las variables meteorológicas

Variable	NO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	ff	T	HR	P
NO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1.00				
ff	0.03	1.00			
T	0.08	-0.22	1.00		
HR	0.13	-0.37	-0.04	1.00	
P	0.03	-0.15	-0.21	0.11	1.00

TABLA 1.9

Matriz de correlación del NO_2 en el TSS IV y las variables meteorológicas

Variable	NO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	ff	T	HR	P
NO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1.00				
ff	-0.14	1.00			
T	-0.32	0.00	1.00		
HR	0.05	-0.06	0.12	1.00	
P	0.37	-0.39	-0.53	-0.27	1.00

TABLA 1.10

Matriz de correlación del NO_2 en el TSS V y las variables meteorológicas

Variable	NO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	ff	T	HR	P
NO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1.00				
ff	-0.02	1.00			
T	-0.02	-0.08	1.00		
HR	0.02	-0.29	-0.11	1.00	
P	-0.19	-0.04	-0.13	-0.19	1.00

TABLA 1.11

Matriz de correlación del NO_2 en el TSS VIII y las variables meteorológicas

Variable	NO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	ff	T	HR	P
NO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1.00				
ff	0.02	1.00			
T	-0.02	-0.14	1.00		
HR	-0.01	-0.43	0.39	1.00	
P	0.08	0.16	-0.50	-0.35	1.00

Siendo para el NO:

$$F_{1-\alpha}^{(k-1;n-k)} = F_{1-0.05}^{(8-1;1626-8)} = 2.01$$

Por tanto:

$$W: \left\{ \frac{S_E^2}{S_D^2} > F_{1-\alpha}^{(k-1;n-k)} \right\} = \left\{ \frac{S_E^2}{S_D^2} > F_{0.95}^{(7;1618)} \right\} = \left\{ \frac{S_E^2}{S_D^2} > 2.01 \right\}$$

$F_o = 5.01 > 2.01 \therefore$ Rechazo $H_o \rightarrow$ no se rechaza H_1 , lo cual indica que existen diferencias significativas en las concentraciones de NO relacionadas con los tipos de situación sinóptica para, por lo menos, uno de estos a un nivel de significancia de 95 %.

Con vistas a determinar cuál o cuáles de los TSS son diferentes, se completó el análisis encontrando un intervalo de confianza (0.1107) y con este se hallaron los TSS con medias estadísticamente diferentes, que fueron aquellos cuyas medias no se encuentran dentro de ese intervalo. En la tabla 1.12, los TSS señalados son aquellos que influyen significativamente en las concentraciones de NO.

Las características de las concentraciones del NO en La Palma, según los tipos de situaciones sinópticas aparecen en la tabla 1.13. De acuerdo con esta clasificación, se tiene que los TSS I (1,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), II (1,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y III (1,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), los cuales reflejan la influencia del anticiclón del Atlántico, presentan una tendencia a incrementar los valores de NO, según aumenta la influencia del anticiclón del Atlántico, motivado por su posición respecto a las fuentes de este contaminante, puesto que son mayores en el TSS I (mayor incidencia anticiclónica), al ser mayor el transporte de contaminantes desde fuentes, tanto naturales, como antropogénicas.

El TSS I mantiene una correlación lineal significativa con variables meteorológicas como la humedad relativa, la temperatura y la fuerza del viento, esta última inversa (Tabla 1.14), mientras que en el TSS III las correlaciones significativas se hallaron con la temperatura y la humedad relativa (Tabla 1.15).

TABLA 1.12

TSS que influyen significativamente en las concentraciones del NO desde 1986 a 2008, expresadas en $\mu\text{g}/\text{m}^3$

TSS	Media ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
I (anticiclón del Atlántico)	1.7755
II (anticiclón extendido)	1.6630
III (gradiente débil)	1.3994
IV (situaciones ciclónicas)	1.7259
V (zonas de convergencia)	1.8393
VI (bajas extratropicales)	2.5758
VII (zonas frontales)	1.5965
VIII (anticiclón migratorio)	1.2962
Intervalo de confianza	1.4301 > x > 1.6515

TABLA 1.13

Concentraciones medias del NO, según los TSS desde 1986 a 2008, expresadas en $\mu\text{g}/\text{m}^3$

TSS	Media	Máximo	Desviación estandar	Mínimo	n
I (anticiclón del Atlántico)	1,8	14,8	2,5	0,1	204
II (anticiclón extendido)	1,7	11,7	2,0	0,1	200
III (gradiente debil)	1,4	15,7	2,4	0,1	311
IV (situaciones ciclónicas)	1,7	14,8	2,6	0,1	58
V (zonas de convergencia)	1,8	12,5	3,0	0,1	61
VI (bajas extratropicales)	2,6	14,0	3,3	0,1	66

TABLA 1.14

Matriz de correlación del NO en el TSS I y las variables meteorológicas

Variable	NO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	ff	T	HR	P
NO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1.00				
ff	-0.17	1.00			
T	0.19	-0.24	1.00		
HR	0.21	-0.38	-0.09	1.00	
P	-0.07	-0.17	-0.27	0.08	1.00

TABLA 1.15

Matriz de correlación del NO en el TSS III y las variables meteorológicas

Variable	NO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	ff	T	HR	P
NO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1.00				
ff	0.03	1.00			
T	0.14	-0.26	1.00		
HR	0.12	-0.28	0.15	1.00	
P	-0.06	-0.08	-0.26	-0.27	1.00

El TSS IV (1,7 µg/m³) presenta valores por encima de su valor histórico. Cuando ocurre esta situación se aprecia una correlación lineal significativa con la presión (Tabla 1.16).

El TSS V (1,8 µg/m³) muestra valores por encima de la media histórica hallada, puesto que más de 90 % de su ocurrencia es en el verano, que favorece el incremento de la actividad biológica de los suelos debido a la mayor humedad en los mismos (Martínez, 1986) y también a la disminución de la fuerza del viento y al incremento de la actividad eléctrica típica de los meses del período lluvioso (Alfonso, 1988; Cuesta, 1990). También entre las causas del incremento del NO debemos tener presente la oxidación del amoníaco, cuya formación biológica es grande en esta época del año y el cual da origen al mismo, (Levine *et al.*, 1984). Otra causa fundamental en las altas concentraciones de este TSS es la presencia de inversiones de temperatura después de la ocurrencia de chubascos y tormentas que provocan una acumulación de contaminantes en las capas bajas de la atmósfera (Cuesta *et al.*, 1995). En este tema, la correlación significativa es inversa con la presión (Tabla 1.17).

El TSS VI (2,6 µg/m³) presenta, al igual que en el caso del NO₂, el mayor valor de concentración por las mismas causas.

En la presencia de los TSS VII (1,6 µg/m³) y VIII (1,3 µg/m³) se muestran valores de las concentraciones de NO por debajo del promedio histórico hallado, las causas de estos valores ya fueron explicadas. Se encontró una correlación lineal significativa con la humedad relativa en el segundo caso (Tabla 1.18).

Siendo para el NH₃:

$$F_{1-\alpha}^{(k-1;n-k)} = F_{1-0.05}^{(8-1;2672-8)} = 2.01$$

Por tanto:

$$W: \left\{ \frac{S_E^2}{S_D^2} > F_{1-\alpha}^{(k-1;n-k)} \right\} = \left\{ \frac{S_E^2}{S_D^2} > F_{0.95}^{(7;1558)} \right\} = \left\{ \frac{S_E^2}{S_D^2} > 2.01 \right\}$$

TABLA 1.16

Matriz de correlación del NO en el TSS IV y las variables meteorológicas

Variable	NO (µg/m³)	ff	T	HR	P
NO (µg/m³)	1.00				
ff	-0.16	1.00			
T	-0.20	0.04	1.00		
HR	-0.18	0.04	0.23	1.00	
P	0.34	-0.36	-0.55	-0.52	1.00

TABLA 1.17

Matriz de correlación del NO en el TSS V y las variables meteorológicas

Variable	NO (µg/m³)	ff	T	HR	P
NO (µg/m³)	1.00				
ff	-0.00	1.00			
T	0.08	-0.47	1.00		
HR	0.07	-0.15	0.05	1.00	
P	-0.42	-0.15	-0.15	-0.42	1.00

TABLA 1.18

Matriz de correlación del NO en el TSS VIII y las variables meteorológicas

Variable	NO (µg/m³)	ff	T	HR	P
NO (µg/m³)	1.00				
ff	-0.03	1.00			
T	0.06	-0.15	1.00		
HR	0.13	-0.42	0.43	1.00	
P	-0.00	0.18	-0.62	-0.40	1.00

$F_0 = 1.93 < 2.02 \therefore$ no rechazo $H_0 \rightarrow$ lo cual indica que no existen diferencias significativas en las concentraciones de NH₃ relacionadas con los TSS para a un nivel de significancia de 95 %. No obstante, se observa que en los TSS I (1,0 µg/m³) y IV (2,2 µg/m³) los valores son extremos (el menor y el mayor, respectivamente) en comparación con su media histórica (1,5 µg/m³). En ambos casos, se encontraron correlaciones significativas con la presión, siendo en el segundo caso inversa (Tablas 1.19 y 1.20, respectivamente).

TABLA 1.19

Matriz de correlación del NH_3 en el TSS I y las variables meteorológicas

Variable	NH_3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	ff	T	HR	P
NH_3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1.00				
ff	0.01	1.00			
T	-0.13	-0.26	1.00		
HR	-0.01	-0.38	-0.08	1.00	
P	0.14	-0.17	-0.32	0.08	1.00

TABLA 1.20

Matriz de correlación del NH_3 en el TSS IV y las variables meteorológicas

Variable	NH_3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	ff	T	HR	P
NH_3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1.00				
ff	0.11	1.00			
T	0.08	0.04	1.00		
HR	0.16	0.04	0.23	1.00	
P	-0.27	-0.36	-0.55	-0.52	1.00

Conclusiones y recomendaciones

Los valores de las concentraciones de los compuestos gaseosos del nitrógeno presentan concentraciones similares a las encontradas en otras partes del mundo (en particular, en los trópicos) en relación con las emisiones desde fuentes naturales.

La marcha anual de las concentraciones promedios mensuales permiten apreciar, en el caso de NH_3 , la influencia de las estaciones del año (períodos poco lluvioso y lluvioso) en el desencadenamiento de los mecanismos biológicos que producen el incremento o la reducción de estos compuestos, puesto que se demostró estadísticamente que en los compuestos NO y NO_2 no había diferencias significativas entre las concentraciones para ambos períodos.

Las variables meteorológicas mostraron su influencia significativa sobre los diferentes procesos formadores, de eliminación o de transformación del NO_2 , NO y NH_3 , en especial, la humedad relativa, con la cual se encontró correlación lineal significativa en todos los casos.

Se encontraron estadísticamente los TSS que influyen significativamente en las concentraciones de los compuestos estudiados; el NH_3 resultó el único que no presenta diferencias significativas.

En los diversos sistemas sinópticos en los cuales se estudió el NO_2 se tiene lo siguiente:

1. Las bajas extratropicales (TSS VI) presentan los mayores valores respecto a los períodos estudiados, mientras que las zonas de convergencia (TSS V) y los anticiclones migratorios (TSS VIII) presentan los más bajos.
2. Los TSS I y III ostentan valores de NO_2 por encima del valor promedio. Los TSS II y VII muestran valores por debajo de su media histórica. El TSS IV presenta valores promedios respecto a su valor medio histórico.
3. En el caso del NO , se halló que TSS I, II y III exhiben una tendencia a incrementar los valores, según aumenta la influencia del anticiclón del Atlántico. El TSS IV y V presentan valores por encima de su valor histórico.
4. El TSS VI (bajas extratropicales) ostenta, al igual que en el caso de NO_2 , el mayor valor de concentración, y en la presencia del TSS VIII (anticiclones migratorios) se muestran valores de las concentraciones de NO por debajo del promedio histórico hallado.

Las recomendaciones más importantes que se derivan de este trabajo son las siguientes:

1. El mantenimiento de la red de monitoreo actual de los principales compuestos del nitrógeno, con el fin de conocer la tendencia de las concentraciones en nuestro país y su comportamiento futuro.
2. Profundizar en la dependencia de las concentraciones de estos compuestos con las variables meteorológicas, y los tipos y subtipos de situaciones sinópticas, para conocer en detalle el clima químico del nitrógeno atmosférico en esta localidad, teniendo

en cuenta de manera cuantitativa las fuentes biológicas de estos contaminantes.

3. La aplicación de transformaciones que permitan la linealización de los coeficientes de las correlaciones, de modo que no pasen inadvertidas aquellas relaciones que obedezcan a otro tipo de ecuaciones y, de esta manera, poder enfrentar el reto de la conservación del medio ambiente atmosférico.

Bibliografía

- ALFONSO, A. (1988): *Climatología de las tormentas locales severas de Cuba y fundamentos para su pronóstico*, Tesis presentada en opción al grado científico de candidato a doctor en Ciencias Geográficas, Matanzas, 174 pp.
- ÁLVAREZ, L, R. MANSO, R. ÁLVAREZ Y I. FORRAJERO (2008): *Distribución espacial de las tormentas eléctricas en la provincia Pinar del Río y su relación con los incendios forestales. Estudio de caso*. Memorias del V Simposium Internacional sobre Manejo Sostenible de los Recursos Forestales (SIMFOR 2008), Universidad de Pinar del Río, Cuba, abril del 2008, ISBN 978-959-16-0655-6, E:\fsccommand\Ponencias\T03_Fuego\t3_20.pdf.
- CUESTA, O. (1992): El dióxido de nitrógeno (NO₂) troposférico y su relación con los tipos de situaciones sinópticas (TSS) en una localidad rural, (entregado) *Rev. Cub. Met.*, 1992.
- CUESTA, O. (1995): *Caracterización de las concentraciones de los principales compuestos del Nitrógeno atmosférico en Cuba y su relación con los tipos de situación sinóptica*, Tesis de doctorado en Ciencias Meteorológicas, La Habana.
- CUESTA SANTOS, O., ARNALDO COLLAZO, MARIA GONZÁLEZ AND ANTONIO WALLO (2006): Humid and drynitrogen deposition via atmosphere in three hydrographic basins in Cuba. *Climate Variability and Change-Hydrological Impacts* (Proceedings of the Fifth FRIEND World Conference held at Havana, Cuba, November 2006), IAHS Publication 308, pp.: 591-595.
- GALLOWAY, J. N., G. E. LIKENS, W. C. KEENE AND J. M. MILLER (1995): "The composition of precipitation in remote areas the world", *J. Geophys. Res.*, 87 (11), pp.: 71-87.
- GALLOWAY J. N., J. D. ABER, J. W. ERISMAN, S. P. SEITZINGER, R. H. HOWARTH, E. B. COWLING, B. J. COSBY *et al.*, (2003): "The nitrogen cascade", *BioScience*, 53: pp.: 341-356.
- GALLOWAY, J. N., A. R. TOWNSEND, J. W. ERISMAN, M. BEKUNDA, Z. CAI, J. R. FRENEY, L. A. MARTINELLI, S. P. SEITZINGER, M. A. SUTTON (2008): "Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions and potential solutions", *Science*, 320, pp.: 889-892.
- HAYASHI, K., I. NOGUCHI, T. OHIZUMI, M. AIKAWA, M. KITAMURA, A. TAKAHASHI *et al.* (2006): "Wet deposition of inorganic nitrogen in Japan: Findings from the Japanese Acid Deposition Survey", 3rd International Nitrogen Conference Contributed Papers, Minami.
- INSMET (1983): *Altas Climático de Cuba*. Editado por el ICGC y confeccionado por el Insmet. pp. 207.
- INSMET (2007): *Centro del Clima: Caracterización climática de la estación La Palma*, pp.: 2-12.
- LAPINEL (1988): "La circulación atmosférica y las características espacio temporales de las lluvias en Cuba", Universidad de La Habana, Academia de Ciencias de Cuba, Instituto de Meteorología.
- LEVINE, J. S, T. R. AUGUSTSSON, I. C. ANDERSONS, J. M. HOELL AND D. A. BREWER (1984): Tropospheric sources of N₀; Lightning and biology, *Atmos. Environ*, vol. 18, no. 9, pp.: 1797-1804.
- LÓPEZ C. (2007): *Introducción a la gestión de la calidad del aire*, Centro de Química y Contaminación Atmosférica. La Habana, Cuba. cap 1, p 1.1-1.39.
- McLauchlan, K. K. (2007): Changes in nitrogen cycling during the past century in a northern hardwood forest. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, p. 104.

- MESZAROS, E. (1981): *Atmospheric chemistry. Fundamental aspect*. Ed. Akademiai Kiadó, Budapest, p. 201.
- RODHE, H. AND R. HERRERA (1988): *Acidification in tropical countries*. BCOPE 36, J. Wiley and sons, Great Britain, p. 405.
- RODRÍGUEZ, A. (1991): *Composición química de las precipitaciones de sistemas meteorológicos y acidez de la lluvia en Cuba*, Tesis presentada en opción al grado científico de candidato a doctor en Ciencias Geográficas, La Habana, p. 111.
- VITOUSEK, P.M., J. D. ABER, R. W. HOWARTH, G. E. LIKENS, P. A. MATSON, D. W. SCHINDLER, W. H. SCHLESINGER AND D. G. TILMAN (1997): "Human alteration of the global nitrogen cycle: Sources and consequences", *Ecological Applications*, vol. 7, no. 3, pp.: 737-750.
- WMO (1977): "Air pollution measurement techniques. Special Environ. Report no. 10, WHO, no. 460, Geneva.
- WMO (1987): "Environmental pollution monitoring research programme no. 45", WMO, técnica 1, document no. 151, Geneva.
- WMO (1991): "The global atmospheres watch: atmospheric pollution and the seas", *Fact Sheet*, no. 8.
- ZAMBRANO, A. (2007): Lluvia ácida. pp.: 192-231.