

Comportamiento de las concentraciones y deposiciones de los principales compuestos de nitrógeno atmosférico en el clima tropical húmedo

Behavior of concentrations and depositions of main atmospheric nitrogen compounds in humid tropical climate

Oswaldo Cuesta Santos

Centro de Contaminación y Química Atmosférica del Instituto de Meteorología
osvaldo.cuesta@insmet.cu

Ángel Maren Vázquez

Recibido: 6 de julio 2012; aceptado 8 de septiembre, 2012

Resumen

El conocimiento del ciclo del nitrógeno en la atmósfera es de gran importancia por los efectos que pueden causar estos compuestos sobre la química y la contaminación atmosférica. En Cuba, la deposición atmosférica de los principales compuestos de nitrógeno varía, aproximadamente, entre 10,8 kgN/ha.año y 129,8 kgN/ha.año durante los últimos veinte años. Las formas oxidadas de nitrógeno representan más de 20 % y la deposición húmeda depende de las características de las precipitaciones de nuestro clima tropical. El NH₃ y el amonio son los elementos más importantes en las condiciones tropicales, algunos de los compuestos de nitrógeno presentan tendencia al aumento de sus concentraciones. Las deposiciones de estos compuestos por la vía atmosférica producen efectos en la retroalimentación de fenómenos, con la acidez de los suelos y las aguas, así como la presencia de nutrientes que pueden provocar una cascada de efectos en el ambiente y, de este modo, afectar la biodiversidad, así como el crecimiento y la productividad de los bosques tropicales.

PALABRAS CLAVE: Ciclo de nitrógeno, deposición ácida, ecosistema terrestre y bosques tropicales.

Abstract

Knowledge of the nitrogen atmospheric cycle is of great importance because of the different compounds over the chemistry and atmospheric pollution. These pollutants have the capacity to affect the human health, different aquatic and terrestrial ecosystems and climate. In Cuba, main atmospheric nitrogen deposition compounds varies approximately from 10,8 kgN/ha.year to 129,8 kgN/ha.year during the last twenty years place. The oxidized nitrogen forms being provided more 20 % and wet deposition depends on our tropical rain climate features. The NH₃ and ammonium are the most important elements in our tropical conditions. This paper is showing more relevant results about main compounds of atmospheric nitrogen in Cuba from analysis one long time series of data and its potential impact on environment.

KEYWORDS: Nitrogen cycle, acid deposition, terrestrial ecosystem and tropical forests.

Introducción

En la actualidad, muchas de las actividades antropogénicas ponen en peligro el funcionamiento y la estructura de los ecosistemas naturales y seminaturales debido a sus efectos sobre las especies endémicas

de animales y plantas. En las últimas décadas, uno de los principales peligros es el incremento de la contaminación atmosférica por los compuestos de nitrógeno. Los impactos más importantes causados por el incremento de la deposición del nitrógeno sobre los sistemas biológicos son los siguientes:

1. Efectos a corto plazo sobre especies individuales de los gases y aerosoles del nitrógeno.
2. Acidificación de los suelos.
3. Incrementos en la susceptibilidad a factores de estrés secundario.
4. Cambios en las relaciones entre las especies (competitividad) que resultan en una pérdida de la biodiversidad.

Los efectos sobre los ecosistemas naturales y seminaturales a causa de la deposición de los compuestos oxidados y reducidos de nitrógeno (N) presentes en la atmósfera se han detectado de diversas formas en Europa (I.T.E., 1995; Lorenz *et al.*, 2006; EEA, 2008), en particular, por el cambio de la composición de las especies, el incremento en la altura de los pastos (con declinación de la biodiversidad), el desequilibrio nutricional y el cambio en la flora de los suelos.

El conocimiento del ciclo atmosférico del nitrógeno posee una gran importancia dado el papel que desempeñan los diferentes compuestos que lo integran sobre la química y la contaminación atmosférica. Estos contaminantes tienen la capacidad de afectar la salud humana, diversos ecosistemas terrestres y acuáticos, y el clima (Galoway, 1995; IPCC, 2007; ICP Forests, 2008).

Se ha considerado que el presente estudio (que abarca el período 1985– 2008) contribuya a la profundización del conocimiento del comportamiento de las concentraciones y deposiciones de los compuestos gaseosos de nitrógeno en nuestro país, y la repercusión que estos tienen sobre el medio ambiente. Durante estos 24 años de estudio, existen etapas

que se consideran de alta complejidad, pues muchos sectores de la economía sufrieron grandes cambios, lo cual, como es lógico, ha modificado el comportamiento de las emisiones de estos compuestos; además, los factores de índole meteorológico-climática también han influido. Conocer las características de estos compuestos para el medio ambiente atmosférico a nivel regional resulta de suma importancia por la incidencia que estos provocan sobre la acidez de la atmósfera, los efectos sobre la productividad en los agroecosistemas y la diversidad biológica, aparte de otros efectos medioambientales, como la corrosión atmosférica y la salud humana, que se ven influidos, bien sea directa o indirectamente por estos elementos clave en la atmósfera.

Materiales y métodos

Para la elaboración de este estudio se tomaron los datos de las estaciones principales de la Red de Control de la Contaminación Atmosférica (Fig. 1) del Centro de Contaminación y Química Atmosférica (CECONT), adscrito al Instituto de Meteorología del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de Cuba, la cual se guía, en lo fundamental, por las metodologías recomendadas por la Organización Meteorológica Mundial para el muestreo y el análisis químico de estos compuestos a nivel regional (WMO, 1986; 2004).

Para el cálculo de los flujos de las deposiciones seca y húmeda del nitrógeno atmosférico, se con-

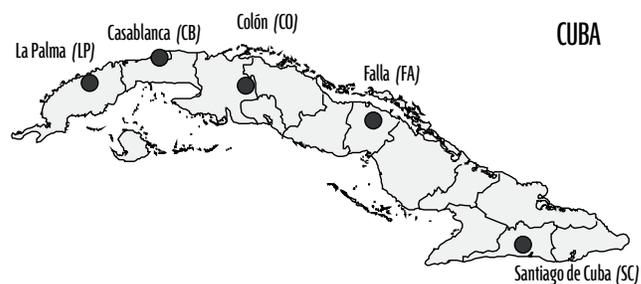


Fig. 1 Plano de ubicación de las estaciones principales.

vierten las concentraciones (expresadas en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) de cada compuesto gaseoso y aerosoles en N (nitrógeno); también se realizó esta conversión (Cuesta, 1995, Cuesta *et al.*, 2006) para la lluvia (en mg/l). En el caso de los flujos de deposición seca, dadas las deficiencias reconocidas para los métodos de muestreo existentes, según nuestras posibilidades de equipos en la actualidad, se procedió al cálculo utilizando la velocidad de deposición y las concentraciones obtenidas del muestreo (WMO, 1991), mientras que en relación con los flujos de la deposición húmeda se utilizaron concentraciones medias pesadas para cada año, a partir de las muestras sumarias mensuales y la cantidad de lluvia. En ambos casos, los flujos de deposición se expresan en $\text{kg-N. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ (Cuesta *et al.*, 1998; 2001).

En este caso, se aplicó una forma de cálculo sencilla, basada en la relación entre la concentración medida en el lugar y una velocidad de deposición determinada experimentalmente, cuya expresión matemática es la siguiente:

$$F = C \cdot V_d$$

Donde: F : flujo de materia hacia la superficie, C : concentración medida y V_d : velocidad de deposición.

Para la selección de los valores de velocidad de deposición (V_d) se analizaron datos reportados por diferentes autores y se seleccionaron los que más se adaptan a las condiciones climáticas de Cuba (Loblack and Erisman, 1992; Holland *et al.*, 1996; López *et al.*, 1998; Cuesta *et al.*, 2001; López, 2007). La tabla 1 muestra los valores seleccionados de velocidad de deposición (V_d) para los elementos estudiados en el presente trabajo, en dependencia del tipo de compuesto, el uso de la tierra y las condiciones climáticas.

TABLA 1

Valores seleccionados de velocidad de deposición

Compuesto	NO_2	NO	NH_3	$\text{NO}_3(\text{A})$	$\text{NH}_4(\text{A})$
La Palma	0.2	0.15	0.3	0.2	0.2
Casablanca	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1
Colón	0.2	0.15	0.2	0.1	0.1
Falla	0.2	0.15	0.2	0.1	0.1
Santiago de Cuba	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1

Nota: $\text{NO}_3(\text{A})$ es el aerosol de nitrato y el $\text{NH}_4(\text{A})$ es el aerosol de amonio.

Análisis de los resultados y discusión

Caracterización de las concentraciones de los compuestos de nitrógeno

Los estudios realizados en zonas rurales de Australia (Ayers *et al.*, 1995) reportan valores anuales para el NO_2 entre $1,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $2,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ —estas estaciones rurales no presentan un ciclo estacional evidente—, mientras que las estaciones que tienen cierta influencia urbana presentan concentraciones entre dos y cuatro veces más altas y un ciclo estacional donde ocurren las máximas concentraciones en el invierno. En el trópico, el comportamiento regional de las fuentes de los óxidos de nitrógeno es menos intenso que el provocado por la quema de los combustibles fósiles en las latitudes medias, en cuyo caso, las fuentes principales son la quema de la biomasa, la actividad biológica de los suelos y las descargas eléctricas (Logan, 1983; Cuesta, 1995).

El comportamiento del dióxido de nitrógeno en las zonas rurales analizadas no presenta grandes contrastes en las concentraciones. En las estaciones que tienen influencia rural, como La Palma, Colón y Falla, predominan las fuentes naturales, como son, entre otras, la producción biológica de los suelos, las descargas eléctricas, la quema de biomasa (Vitousek, P. M. *et al.*, 1997; Galloway, *et al.* 2003). Los valores medios oscilan entre $0,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $2,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, que son similares a los reportados por Johansson *et al.*, 1988;

Martin y Barber, 1984; y Fukino *et al.*, 1984 en los Estados Unidos, Inglaterra y Japón, respectivamente.

Las estaciones de muestreo de Casablanca y Santiago de Cuba están ubicadas en zonas más cercanas a ciudades, donde la actividad del hombre ejerce una mayor influencia sobre la contaminación del aire. A causa de la influencia de fuentes antropogénicas, principalmente, la acumulación de la mayoría de las industrias, el transporte automotor y el consumo doméstico de combustibles, se registraron concentraciones entre $1,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $8,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En la estación de Santiago de Cuba, para este mismo compuesto, se registran valores medios mensuales en el rango $1,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ - $2,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

El comportamiento de las concentraciones reportadas para el NO en zonas rurales de clima subtropical de Europa y los Estados Unidos presenta valores entre $0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $6,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El monóxido de nitrógeno presenta los máximos en verano y las concentraciones son superiores sobre el continente que sobre los océanos. Para el trópico, en regiones rurales, estos compuestos exhiben un comportamiento análogo (Galoway, 1995). Los valores medios mensuales encontrados de las concentraciones de NO en las principales estaciones de muestreo varían entre $0,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $6,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Las menores concentraciones se reportaron para las estaciones con características rurales (La Palma, Falla y Colón), lo cual está acorde con la potencia de las fuentes naturales presentes en estas localidades; los valores medios mensuales oscilan entre $0,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $2,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Las estaciones de Casablanca y Santiago de Cuba se encuentran situadas en lugares muy cercanos a las ciudades, donde las actividades realizadas por el hombre influyen en gran medida sobre la calidad del aire. Las potentes fuentes antropogénicas que incluyen, en lo fundamental, a los motores de los vehículos, las industrias y la utilización de combustibles en los hogares, entre otras, fueron las causas principales

que provocaron que se registraran las mayores concentraciones de NO (entre $1,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $6,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Entre los principales compuestos gaseosos del nitrógeno, el amoníaco siempre presenta los valores más altos de concentración, las cuales varían entre $1,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $8,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$; estas cifras son similares a las reportadas en zonas rurales de clima subtropical de Europa y los Estados Unidos, donde este contaminante presenta concentraciones en el rango $1,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ - $0,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Los valores máximos ocurren durante el período lluvioso. La producción agropecuaria es reconocida como la mayor fuente de amoníaco en Europa y contribuye con la mitad de las emisiones de NH_3 a escala global (Sommer and Hutchings, 1995).

Las estaciones de monitoreo que reportaron los valores de menor concentración fueron las que están inmersas en zonas rurales (La Palma, Colón y Falla), dada la no existencia de fuentes antropogénicas potentes en sus cercanías. Los valores medios se hallan entre $1,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $2,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El comportamiento del amoníaco muestra que las mayores concentraciones ocurren en el período lluvioso, donde la temperatura y la humedad relativa son máximas.

Las estaciones que tienen una fuerte influencia urbana, como Casablanca y Santiago de Cuba, registran casi siempre los valores más altos de concentración, por estar situadas en lugares muy cercanos a las ciudades, donde las actividades del hombre son más que evidentes. Las potentes fuentes antropogénicas que incluyen, principalmente, las industrias, las zonas de viviendas, entre otras, han sido las causas de que durante este período se registren valores entre $2,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $8,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en esas localidades.

Los valores máximos se reportaron en Casablanca, con lo cual se refleja la influencia directa de las fuentes antropogénicas de la ciudad. El comportamiento anual de las concentraciones de NH_3 muestra en la estación de Casablanca un máximo absoluto de $8,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (a inicios del período lluvioso durante el mes de mayo), el cual puede ser el resultado de la

influencia del aumento de la temperatura, la humedad relativa y la caída de la velocidad del viento, que provocan una baja dispersión de los contaminantes. Para Santiago de Cuba se presenta una variación de las concentraciones entre 2,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 6,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Los valores medios hallados para las concentraciones de Santiago de Cuba y Casablanca son 3,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 6,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente.

Los aerosoles de nitrato representan otro compuesto importante del ciclo atmosférico del nitrógeno en la química atmosférica; sus partículas, en mayoría, son producidas por las reacciones inducidas fotoquímicamente, las cuales incluyen la oxidación del NO_2 , para formar ácido nítrico y nitrato (Appel, 1980). Dado el seguido crecimiento de las emisiones de NO_2 , son notables los incrementos en las concentraciones de nitratos encontrados en países de alto desarrollo (Cadle, 1985).

El comportamiento de las concentraciones de los aerosoles de nitrato encontrados en las estaciones con influencia rural presenta, para el caso del nitrato, un comportamiento similar al NO_2 , aunque con menos contraste entre sus valores, lo cual se asemeja a los reportados por Prospero y Jennings (1996 y 1997) para el Atlántico Norte, sobre todo para Barbados e Izaña (0,53 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 0,77 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), mientras que para Bermudas y Miami (1,49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 1,87 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) presentan valores más altos, lo cual responde a las influencias continental y antrópica mayores en estas localidades.

Las estaciones localizadas en zonas rurales (La Palma, Colón y Falla) reportaron los valores de menor concentración, dada la baja potencia de las fuentes naturales y antropogénicas del nitrato cercanas a la estación. Los valores medios se hallan entre 0,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 0,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; los valores máximos ocurren, principalmente, en el verano, durante el período lluvioso.

Las concentraciones de nitrato halladas en aerosoles muestran la presencia de los mayores valores medios en las estaciones de Santiago de Cuba y Casablanca, seguidas de Falla; esta relación revela la in-

fluencia directa de las fuentes antropogénicas, aunque las cifras mantienen un rango de poca variación (0,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ –0,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Las fuentes naturales principales del aerosol de amonio son las reacciones químicas producidas en la atmósfera por el compuesto precursor el NH_3 , aunque otras fuentes, tales como los humos de incendios naturales o provocados, aportan cantidades considerables de este compuesto. El comportamiento anual de las concentraciones del aerosol de amonio para las estaciones estudiadas exhibe una variación de las concentraciones entre 0,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 4,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En las estaciones con características rurales, sobre todo Colón y Falla, presentan los valores más altos, como resultado de la fuerte influencia de actividad agropecuaria desarrollada en sus cercanías. Al comparar los datos tomados de las estaciones ubicadas en zonas rurales con los de las estaciones con mayor influencia urbana-industrial (Casablanca y Santiago de Cuba), puede observarse un contraste que, sin duda, está causado por la contribución de la actividad agropecuaria. Las muestras para estas dos estaciones oscilan entre 2,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 4,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que La Palma presenta variaciones más pequeñas (0,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ –1,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Los valores de los aerosoles de amonio de Casablanca y Santiago de Cuba se hallan entre 0,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 2,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, muy similares a los reportados por Prospero y Jennings (1996 y 1997) para zonas de las Bermudas y Miami.

Las fuentes naturales de los nitratos en la lluvia son, principalmente, los gases y los aerosoles que se forman durante el ciclo del nitrógeno en los procesos nitrificantes de los suelos, la degradación biológica y la combustión de la biomasa, mientras que las fuentes antropogénicas, que resultan mucho menores en las regiones rurales, son la quema de los combustibles fósiles (industria y vehículos), y tienen un gran peso en las zonas industriales y urbanas (Cuesta *et al.*, 2006).

Las estaciones La Palma, Colón, y Falla presentan un rango de variación de las concentraciones de ni-

trato en la lluvia entre 0,5 mg/l y 2,1 mg/l. La Palma muestra los valores más bajos entre las tres estaciones con características rurales. La estación de Casablanca (0,7 mg/l-1,6 mg/l) presenta valores más altos de concentración con respecto a Santiago de Cuba (0,3 mg/l-0,7 mg/l); estos valores son similares a los reportados durante 2007 por las estaciones de monitoreo de La Florida (Miami y Tampa), perteneciente a la red del Programa Nacional de Deposición Atmosférica de los Estados Unidos, las cuales presentan valores cercanos a 0,5 mg/l (<http://nadp.sws.uiuc.edu/lib/>).

Los valores de las concentraciones medias mensuales del amonio en la lluvia en Cuba oscilan entre 0,4 mg/l y 2,3 mg/l. La principal fuente natural de este compuesto es la actividad bacteriana en los suelos, que luego se traslada hacia la atmósfera como amoníaco (NH_3), y en aerosoles de amonio, reaccionando con el azufre para formar el sulfato de amonio de origen, principalmente, antropogénico, que es uno de los compuestos causantes de la acidez de la lluvia.

Las estaciones La Palma y Falla muestran los valores más bajos. La estación de Colon presenta un máximo absoluto bien definido de 2,3 mg/l (en diciembre para el período poco lluvioso) y un mínimo en el período lluvioso durante agosto, septiembre y octubre; los meses restantes manifiestan un comportamiento bastante uniforme. En el caso de las estaciones con características urbanas, como Casablanca y Santiago de Cuba, el comportamiento anual de las medias mensuales de las concentraciones de amonio en la lluvia presenta valores entre 0,4 mg/l y 1,5 mg/l. Para la estación de Casablanca se observan, después de Colón, los valores más altos, con un máximo absoluto muy bien definido (1,5 mg/l) en diciembre durante el período poco lluvioso. Estos valores están en consonancia con los reportados en 2007 por las estaciones de monitoreo pertenecientes a la red del Programa Nacional de Deposición Atmosférica de los Estados Unidos (<http://nadp.sws.uiuc.edu/lib/>).

Caracterización de las deposiciones

Caracterización de las deposiciones de los principales compuestos de nitrógeno en La Estación La Palma

Los valores anuales de la deposición total (gases, aerosoles y lluvia) de los principales compuestos de nitrógeno [NO_x ($\text{NO}_2 + \text{NO}$), NH_3 , NO_3^- (a) como aerosol de nitrato, NH_4^+ (a) como aerosol de amonio, NO_3^- (p) como nitrato en la precipitación y el NH_4^+ (p) como amonio en la precipitación] de la estación La Palma, aparecen reflejados en la figura 2 para el período 1985-2008. Estos valores de deposición (expresados en $\text{kg-N.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$) oscilaron entre $13,3 \text{ kg-N.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$ y $44,8 \text{ kg-N.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$, con un valor medio anual de $24,1 \text{ kg-N.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$. El valor mínimo, ocurrido en 1996, fue el resultado de la baja presencia de amoníaco, lo cual pudo asociarse a condiciones climáticas y de baja explotación agroforestal, puesto que alrededor de este año la economía nacional sufrió una profunda crisis económica. Además, el máximo durante 2001 se corresponde con la alta presencia de amoníaco y aerosoles de amonio en la atmósfera, dadas las condiciones de alta humedad en los suelos y la utilización de fertilizantes nitrogenados en cultivos en la cercanía de la estación.

La potencia de las fuentes naturales emisoras de estos compuestos, la gran cantidad de precipitación dada la ubicación geográfica de esta estación y el hecho de estar enclavada en una zona agroforestal justifican las concentraciones elevadas de estos compuestos. La producción agropecuaria es reconocida como la mayor fuente de amoníaco atmosférico en Europa (Fischer, R. *et al.*, 2007) y contribuye con la mitad de las emisiones de NH_3 a nivel global (Sommer and Hutchings, 1995). En general, estos valores anuales son similares a los reportados en gran parte de Europa (NN. UU., 1991; EEA, 2008), con excepción de los centros urbanos e industriales, donde la deposición en Europa es significativamente mayor.

Comportamiento de las concentraciones y deposiciones de los principales compuestos de nitrógeno atmosférico en el clima tropical húmedo

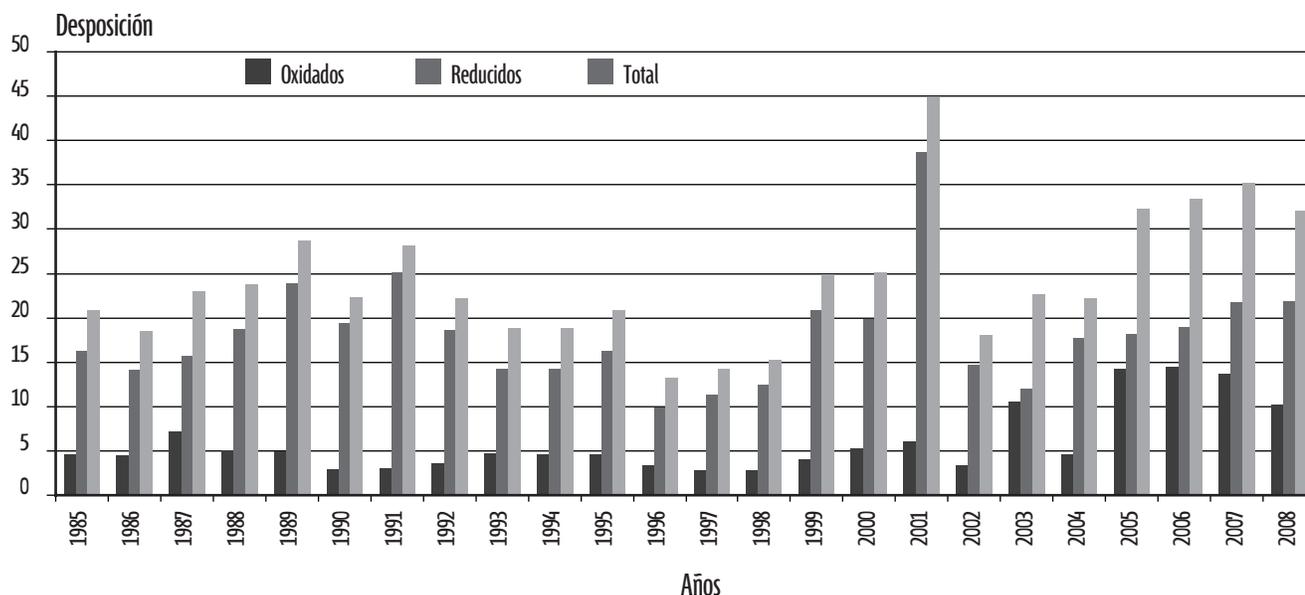


Fig. 2 Depositiones anuales totales de los principales compuestos de nitrógeno atmosférico en La Palma (oxidados y reducidos), expresada en kgN/ha.año .

Al analizar la razón entre los compuestos reducidos y oxidados de nitrógeno en el período estudiado, se tiene que en los años iniciales de este siglo los compuestos oxidados han cobrado mayor peso y, en general, representan 25 % de la deposición total. Entre las cinco estaciones estudiadas, los mayores registros de días con tormentas eléctricas fueron reportados para este punto de muestreo (Álvarez L., 2006); este fenómeno produce cantidades considerables de compuestos oxidados.

Por su ubicación geográfica, la Estación La Palma puede considerarse representativa de los ecosistemas boscosos del occidente de Cuba (Cuesta *et al.*, 1998); esta región, por su tipo de suelo, clasificado como de acidez muy fuerte (pH 4,1-4,5), es muy sensible a la deposición ácida, lo cual puede causar riesgos ecológicos nocivos sobre la productividad de los suelos, afectando el crecimiento de los árboles en las zonas boscosas y la productividad de algunos otros cultivos.

Estos valores reflejan el gran peso del amoníaco en la deposición del nitrógeno total en nuestras condiciones tropicales; además, a corto plazo, el amoníaco neutraliza la acidez de la atmósfera, pero en los últimos tiempos se ha demostrado que a mediano y largo

plazos puede producir la acidificación de los suelos y las aguas (Galoway, 1995).

La determinación de tendencias actuales al incremento de la deposición (Sánchez y Cuesta, 2000; Cuesta *et al.*, 2006) de compuestos de azufre y nitrógeno en el país, junto con la identificación de áreas vulnerables a la deposición ácida (López *et al.*, 1998), identifica a este proceso como un factor de potenciación para la ocurrencia de impactos negativos en ecosistemas forestales, en particular, para algunas zonas de Camagüey a Matanzas y en Pinar del Río, donde existen áreas cuya vulnerabilidad a la deposición ácida ha sido probada. Este resultado indica, asimismo, la necesidad de realizar estudios detallados que permitan conocer el comportamiento actual de la deposición y sus consecuencias para especies en esos ecosistemas.

Las graves consecuencias que tienen las deposiciones de nitrógeno sobre la estabilidad y la biodiversidad en ecosistemas en Europa, han motivado diversos estudios para conocer las *cargas críticas* para el nitrógeno. La carga crítica depende de los manejos pasado y presente, así como del tipo de ecosistema y las condiciones de los suelos. En varios talleres internacionales en Europa se han sugerido valores de carga crítica para

diversos ecosistemas, los cuales podrían contribuir a evitar cambios en la composición de especies, el desbalance nutricional y los excesos de lixiviación de nitrato (Tabla 2). Puede observarse que la carga crítica para los ecosistemas más sensibles está entre 5 kg N ha⁻¹año⁻¹ y 20 kg N ha⁻¹año⁻¹. Aún no se sabe en qué medida estos valores de carga crítica puedan aplicarse a otras regiones como las tropicales; sería interesante señalar en otras regiones aquellas áreas sujetas a deposiciones de nitrógeno mayores que 5 kg N ha⁻¹año⁻¹, 10 kg N ha⁻¹año⁻¹ o 20 kg N ha⁻¹año⁻¹, con el fin de estimar de alguna manera los riesgos a los ecosistemas (SEI, 1998). Además, los valores de deposición de los compuestos de nitrógeno encontrados en La Estación La Palma son similares o superiores a los reportados en Europa, donde se reportan efectos nocivos en diversos ecosistemas al superarse la carga crítica para el nitrógeno.

Los suelos y aguas superficiales se están acidificando sobre áreas extensas de Europa y Norteamérica; estos cambios en el suelo y la química del agua superficial conducen a impactos sobre el crecimiento

de las plantas, y han mermado la abundancia de peces. La acidificación está implicada como uno de los más importantes factores en el extenso deterioro forestal experimentado en Europa y Norteamérica, el cual comienza a observarse ahora más frecuentemente en Asia. Aunque los mecanismos son relativamente complejos, las investigaciones han logrado grandes avances en el conocimiento de las emisiones de azufre y nitrógeno que pueden conducir a la acidificación de ecosistemas en países en desarrollo; se han encontrado algunas evidencias de estos fenómenos en China. Las implicaciones de la acidificación para el desarrollo forestal, la producción de cultivos sobre suelos ácidos, la biodiversidad y la abundancia de peces, son importantes y requieren una atención mayor en los países en desarrollo.

Los valores de deposición de los principales compuestos de nitrógeno encontrados en la Estación La Palma pueden estar provocando, potencialmente, efectos en la acidificación de las aguas superficiales (embalses y lagos), suelos y bosques. Los estudios de

TABLA 2

Estimados de carga crítica para diferentes tipos de vegetación en Europa sobre la base de observaciones empíricas e investigaciones experimentales

Tipos de vegetación	Carga crítica (kg N ha ⁻¹ año ⁻¹)	Criterio
Bosques de coníferas ácido, manejado	10-25	Lixiviación de nitrato/cambio en la flora
Bosque caducifolio ácido, manejado	15-20	Cambios en la flora
Bosque caducifolio calcáreo	15-20	Cambios en la flora
Brezal en sitio bajo	15-22	Transición de brezal a gramíneas
Pastizal rico en especies, ácido, bajo	7-20	Descenso en la abundancia de especies sensibles
Brezal Ártico/alpino	5-15	Descenso en líquenes y musgos y aumento de gramíneas
Pastizales ricos en especies, calcáreos	14-25	Descenso en diversidad y aumento de gramíneas altas
Pastizales ricos en especies, neutros	20-30	Descenso en diversidad y aumento de gramíneas altas
Pastizales montanos/subalpinos	10-15	Descenso en diversidad y aumento en gramíneas altas
Lagos poco profundos, agua suave	5-15	Descenso en la abundancia de especies sensibles
Pantanos ombrotóxicos	15-20	Descenso en musgos típicos y aumento de gramíneas
Páramos en alturas	15-20	Descenso en vegetación de ericáceas

Fuente: Stockholm Environment Institute (1998).

Nota: El intervalo de carga crítica representa, tanto la variación entre ecosistemas, como la incertidumbre en los valores de carga crítica.

los efectos producidos por la deposición ácida deben realizarse de forma integrada y armónica entre los diversos especialistas relacionados con la protección del medio ambiente y los recursos naturales, puesto que es la única forma de preservar el equilibrio ecológico y la biodiversidad que requiere nuestro planeta.

Caracterización de las deposiciones de los principales compuestos de nitrógeno en La Estación Colón

Los valores de deposición muestran un valor medio anual de 30 kg-N.ha⁻¹.año⁻¹ para la estación Colón. Se muestra una oscilación de las deposiciones, desde un mínimo de 20,4 kg-N.ha⁻¹.año⁻¹ ocurrido en 1996, hasta un máximo bien definido de 39.5 kg-N.ha⁻¹ en 2002. Desde el inicio del período en estudio, hasta 1995, las deposiciones experimentaron cambios muy pequeños (entre 28.0 kg-N.ha⁻¹ y 33.3 kg-N.ha⁻¹); el menor valor obtenido entre 1996 y 1997 fue causado por la baja presencia de amoníaco, lo cual puede estar asociado a condiciones climáticas y de baja explotación agropecuaria, puesto que durante la década de los noventa nuestro país atravesaba una crisis económica nacional. Este mínimo también se relaciona con la baja producción de

óxidos de nitrógeno, lo cual puede estar asociado con una disminución de la ocurrencia de días con tormentas eléctricas (Álvarez L., 2006). A partir de 1998, se inició un incremento de las deposiciones hasta obtener un máximo, en 2002, asociado con la alta presencia de amoníaco y aerosoles de amonio en la atmósfera, debido, posiblemente, a condiciones de alta humedad en los suelos y la utilización de fertilizantes nitrogenados en cultivos en la cercanía de la estación (Fig. 3).

De las tres estaciones estudiadas con características rurales, Colón presenta los mayores valores de deposición de los compuestos principales de nitrógeno. Se ratifica la potencia de las fuentes naturales en esta estación situada en la parte central del territorio insular, la actividad agropecuaria que se desarrolla en sus alrededores, la gran cantidad de precipitación causada por la ubicación geográfica de la estación y la posible influencia de la ciudad de Colón (Sánchez *et al.*, 1998; Sánchez y Cuesta, 2000). La localidad de Colón ostenta un desarrollo en la producción agropecuaria, la cual es reconocida como una fuente importante de amoníaco atmosférico en Europa y otros países (Fischer, R. *et al.*, 2007) y contribuye con la mitad de las emisiones de NH₃ a nivel global (Sommer and Hutchings, 1995).

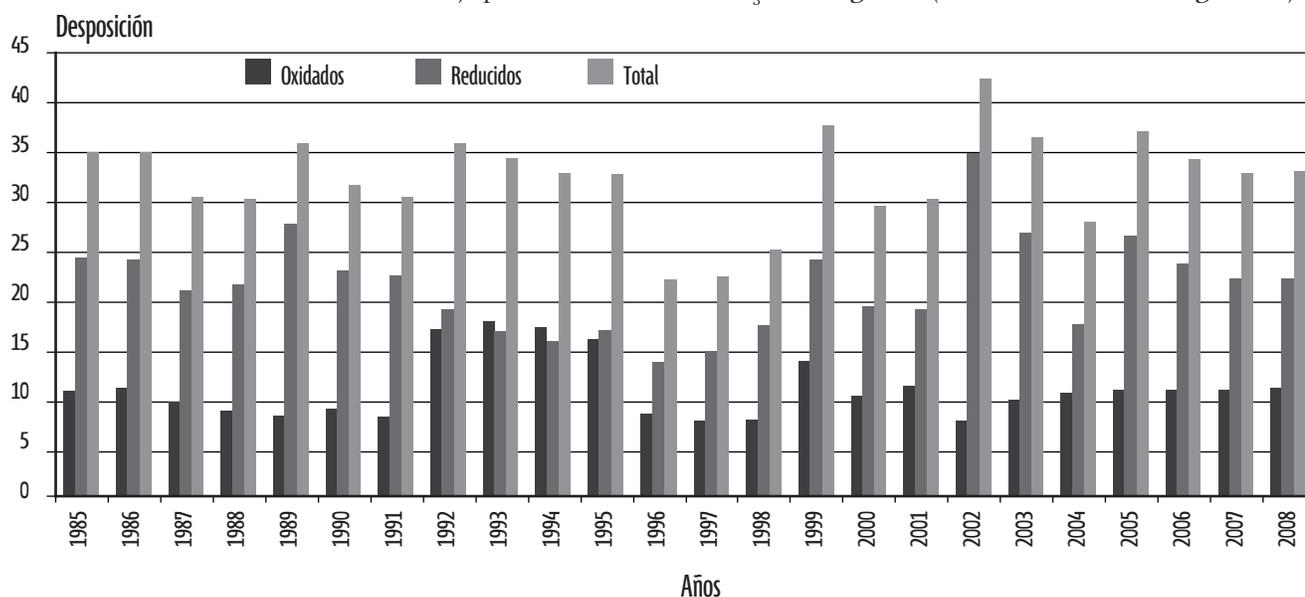


Fig. 3. Depositiones anuales totales de los principales compuestos de nitrógeno atmosférico en Colón (oxidados y reducidos), expresadas en kgN/ha.año

Al analizar la relación entre los compuestos reducidos y oxidados de nitrógeno en el período analizado, tenemos que en los últimos años de la década de los ochentas los compuestos reducidos mantenían siempre valores mucho mayores que los oxidados; a principio de los noventas, esta diferencia comenzó a disminuir, hasta que durante 1993–1994 los compuestos oxidados superaron a los reducidos. A partir de 1996, las diferencias entre las deposiciones volvieron a restablecerse y los compuestos reducidos ocuparon 66 %.

Por su ubicación geográfica y uso de los suelos en la producción agropecuaria, la estación Colón puede considerarse representativa de la llanura Habana-Matanzas. Sus suelos, clasificados como ligeramente ácidos, no son tan sensibles a la deposición ácida, pero debe mantenerse un monitoreo sistemático, puesto que el exceso de nitrógeno (como nutriente) también puede provocar competencia entre las especies, provocando cambios en la diversidad biológica.

En la estación Colón se han presentado altos valores de deposición de amoníaco, con un alto porcentaje en la deposición del nitrógeno total en esta

localidad. Además, se sabe que el amoníaco, a corto plazo, neutraliza la acidez de la atmósfera, pero en los últimos tiempos se ha demostrado que a mediano y largo plazos puede producir la acidificación de los suelos y las aguas (Galoway, 1995).

Caracterización de las deposiciones de los principales compuestos de nitrógeno en La Estación Falla

Los valores de deposición muestran un valor medio anual de $23,1 \text{ kg-N.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$ para la estación Falla, mientras que los valores oscilan, desde un mínimo de $10,7 \text{ kg-N.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$ ocurrido en 1990, hasta un máximo bien definido de $37,7 \text{ kg-N.ha}^{-1}$ en 2003. El menor valor obtenido en 1990 fue causado por la baja presencia de amoníaco, lo cual puede estar asociado a condiciones climáticas (sequía) y de bajos niveles de producción agrícola. En 2000 se inició un incremento en los datos hasta llegar a obtener un máximo en 2003, asociado con la alta presencia de amoníaco y aerosoles de amonio en la atmósfera, dadas las condiciones de alta humedad en los suelos y la utilización de fertilizantes nitrogenados en cultivos en la cercanía de la estación (Fig. 4).

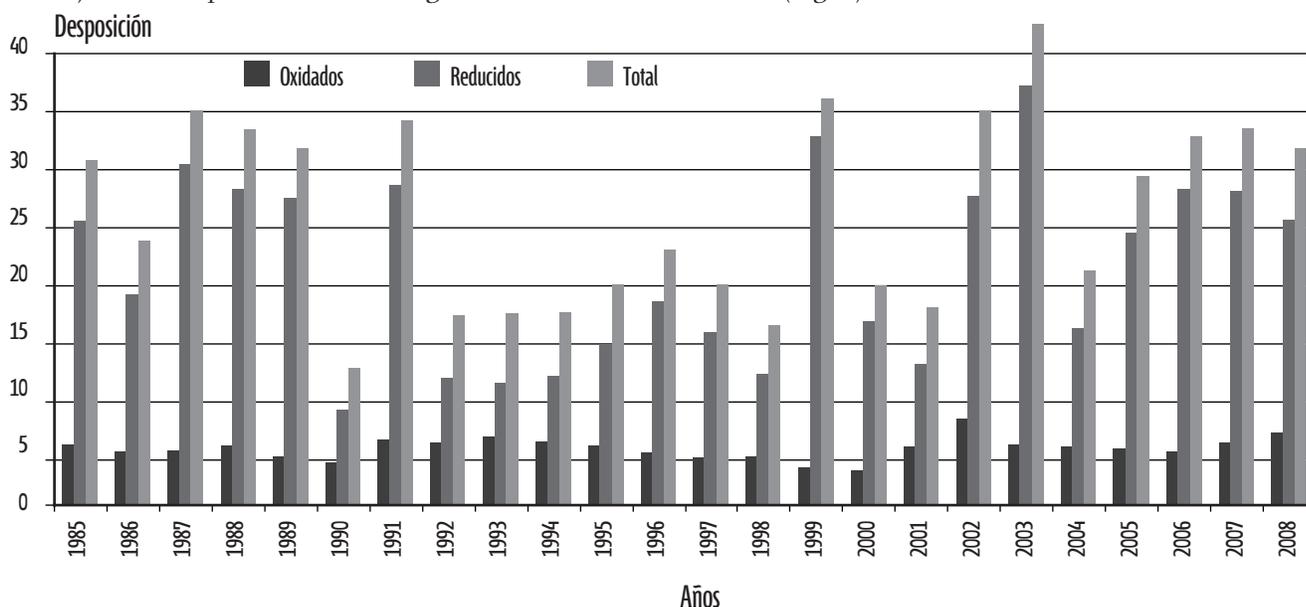


Fig. 4. Depositiones anuales totales de los principales compuestos de nitrógeno atmosférico en Falla (oxidados y reducidos), expresadas en kgN/ha.año .

Las más elevadas deposiciones en este punto de muestreo son el resultado de una serie de procesos y factores que incrementan la potencia de las fuentes naturales y antropogénicas. Los principales factores se deben a la ubicación en una zona donde predominan las actividades agrícolas. En este sentido, también el amoníaco desempeña una contribución fundamental en la deposición del nitrógeno atmosférico total.

Al analizar la razón entre los compuestos reducidos y oxidados de nitrógeno en el período estudiado tenemos que en los años iniciales de este siglo los compuestos oxidados han cobrado mayor peso y, en general, estos representan 19 % de la deposición total. Por su ubicación geográfica, la estación Falla puede considerarse representativa de las regiones agrícolas donde predominan la caña de azúcar y cultivos varios; esta región, por su tipo de suelo, clasificado como neutro, no es tan sensible a la deposición ácida, pero un incremento de esta puede causar riesgos ecológicos nocivos sobre la productividad de los suelos y afectar el crecimiento agrícola.

Caracterización de las deposiciones de los principales compuestos de nitrógeno en La Estación Casablanca

Los valores de deposición muestran un valor medio anual de $41,0 \text{ kg-N.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$, en la estación Casablanca; estas oscilaron entre $24,1 \text{ kg-N.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$ y $129,8 \text{ kg-N.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$. El valor mínimo, ocurrido en 1998 (Fig. 5), tal vez fue provocado por la baja presencia de amoníaco, lo cual puede estar asociado a condiciones climáticas que provocan bajas deposiciones y de relativamente baja influencia antropogénica, puesto que, alrededor de este año, la economía nacional sufrió una profunda crisis económica. Además, el máximo obtenido en 2005 se asoció con la alta presencia de amoníaco en la atmósfera, dadas las condiciones de alta precipitación y humedad en los suelos.

La cercanía de esta estación a la ciudad hace que las concentraciones de contaminantes de nitrógeno emitido por fuentes antropogénicas se conviertan en las causas fundamentales de los altos valores de los principales compuestos de nitrógeno en este lugar. El tráfico de vehículos, los procesos industriales y la quema de biomasa, entre otras, son reconoci-

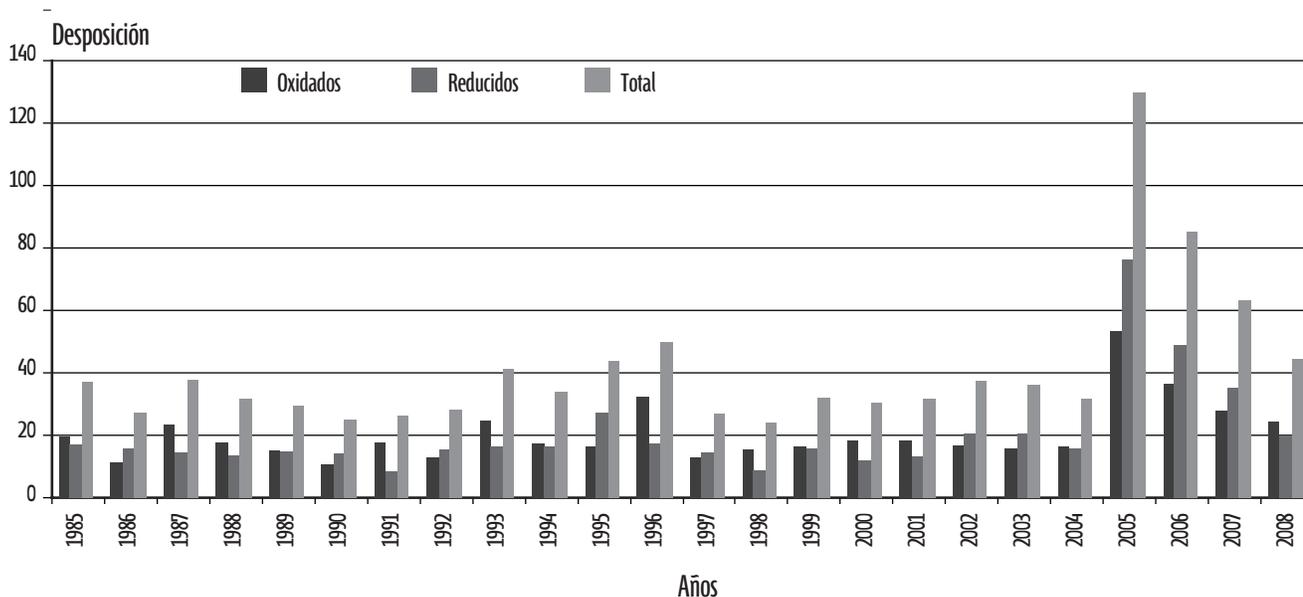


Fig. 5. Depositiones anuales totales de los principales compuestos de nitrógeno atmosférico en Casablanca (oxidados y reducidos), expresadas en kgN/ha.año .

das como las fuentes principales de algunos de estos compuestos en zonas urbanas desarrolladas de Europa y los Estados Unidos (Logan, 1983; Wisley, 1991; Cuesta, 1996). Para esta estación, durante el período de análisis, se obtienen los mayores valores de deposición, tanto para los compuestos reducidos, como para los oxidados del nitrógeno, y ambos presentan igual porcentaje. En Casablanca, desde los años iniciales de este siglo, los valores de los compuestos oxidados se han incrementado.

Estos altos valores pueden provocar efectos de corrosión, los cuales causan daños a los materiales por reacciones químicas o electroquímicas con el medio que los rodea. La deposición de contaminantes acidificantes sobre los materiales, a menudo, incrementa dramáticamente las tasas de deterioro. Muchos tipos de materiales son afectados, entre estos, los metales, las superficies pintadas, las rocas calcáreas, el yeso, los polímeros y papeles; estos materiales pueden ser encontrados en edificaciones y en infraestructuras que, en los países industrializados, constituyen cerca de 50 % del capital real. La acidificación del suelo y las aguas conlleva aumentos en la corrosión de instalaciones soterradas y tuberías, y pueden, incluso, afectar las fuentes de agua potable (Zhao and Xiong, 1988; Kucera and Fitz, 1995).

Esta estación, que produce las mayores deposiciones, puede estar provocando impactos negativos sobre los ecosistemas, acidificando los suelos, las aguas superficiales (ríos, lagunas, embalses y lagos) y subterráneas, provocando la pérdida de la biodiversidad, así como otros efectos sobre los materiales y el medio ambiente (Luttermann, A., and Freedman, B., 2000). En general, los efectos sobre el medio deben valorarse de forma integral, puesto que cada ecosistema responder a la deposición ácida, según las características naturales y en dependencia del manejo al que está sometido por el hombre (Cuesta *et al.*, 1999; Matson *et al.*, 2002).

En el caso de las aguas superficiales, estas deposiciones de los compuestos de nitrógeno pueden estar

provocando un aumento de las concentraciones de algunos metales (aluminio, plomo, zinc, cadmio y mercurio), los cuales son extremadamente tóxicos y pueden causar problemas a los seres vivos que habitan estos ecosistemas e, incluso, pueden llegar al interior del organismo humano mediante los alimentos.

Caracterización de las deposiciones de los principales compuestos de nitrógeno en la estación de muestreo Santiago de Cuba

La estación de Santiago de Cuba manifiesta, en general, cifras altas de deposición de los compuestos nitrogenados (Fig. 6), lo cual se debe a que en las proximidades a este punto de muestreo se producen altas concentraciones de estos contaminantes debido a las emisiones antropogénicas de las fuentes de las ciudades. Las deposiciones oscilan entre un mínimo de 15.9 kg-N.ha⁻¹.año⁻¹, ocurrido en 1989, y un máximo bien definido de 109.1 kg-N.ha⁻¹.año⁻¹, en 2003, con un valor medio anual de 28.3 kg-N. ha⁻¹.año⁻¹.

De 1985 a 2000, las deposiciones experimentaron cambios de muy poca magnitud (entre 15.9 kg-N. ha⁻¹. año⁻¹ y 26.9 kg-N. ha⁻¹.año⁻¹). A inicios del nuevo siglo se produjo un incremento en las deposiciones, cuando se alcanzó un máximo, en 2003, asociado con la alta presencia de compuestos oxidados del nitrógeno, principalmente los compuestos gaseosos (NO₂ y NO), provocado por el incremento de las actividades antropogénicas durante los primeros años de este siglo.

El comportamiento anual de los valores de las deposiciones que se muestran para Santiago de Cuba son semejantes a los reportados en gran parte de Europa (NN.UU., 1991; Galoway, 1995; NN.UU., 1999), con la excepción de los grandes centros urbanos e industriales, donde las deposiciones son significativamente mayores.

La estación de muestreo de Santiago de Cuba se encuentra localizada en una zona urbano-residencial. Aunque las fuentes antropogénicas de la ciudad no se encuentran, relativamente, cerca del punto de

Comportamiento de las concentraciones y deposiciones de los principales compuestos de nitrógeno atmosférico en el clima tropical húmedo

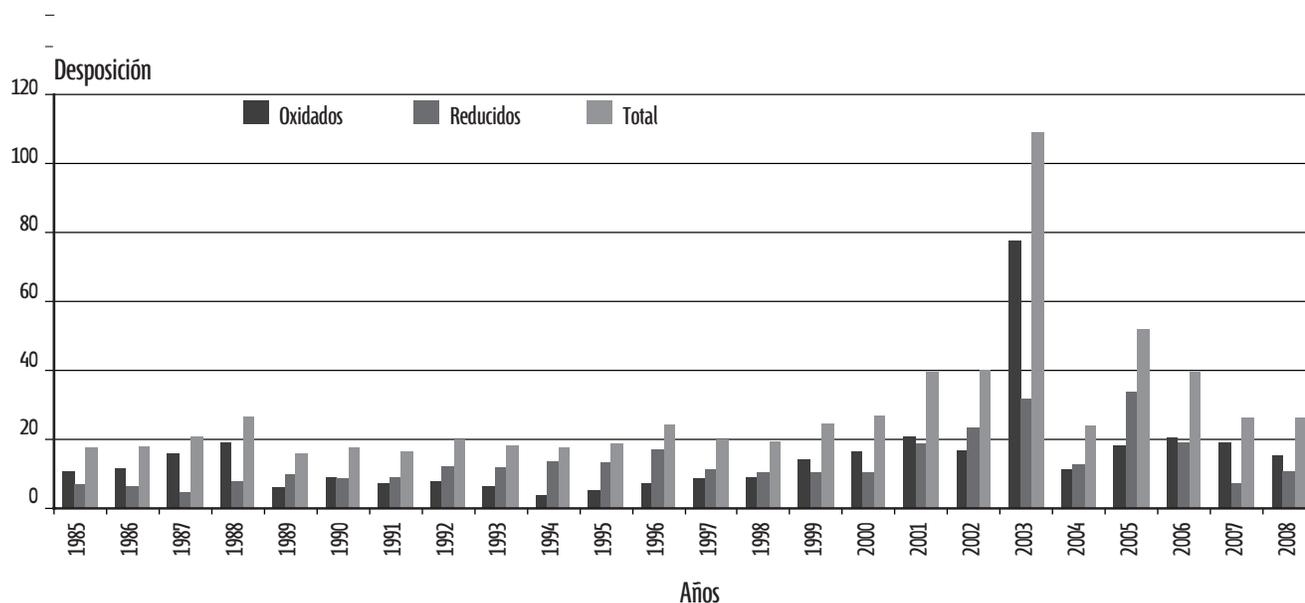


Fig. 6 Depositiones anuales totales de los principales compuestos de nitrógeno atmosférico en Santiago de Cuba (oxidados y reducidos), expresadas en kgN/ha.año.

muestreo, esta estación recibe la influencia de contaminantes emitidos por el tráfico de vehículos y los procesos industriales, reconocidos como las fuentes principales de algunos de estos compuestos en zonas urbanas desarrolladas (CETESB, 2005).

Al analizar la razón entre los compuestos reducidos y oxidados de nitrógeno en el período en estudio, se observa que, en los últimos años de la década de los ochentas, los compuestos oxidados mantenían siempre valores mucho mayores que los reducidos. Durante la década de los noventas, nuestro país atravesó por una crisis económica que produjo variaciones en la potencia de algunas fuentes antropogénicas y ello provocó un ascenso en los valores de los compuestos reducidos que superaba a los oxidados. A partir de 1999 se inició, nuevamente, un aumento de los contaminantes oxidados y se alcanzaron los valores máximos de deposición; después se manifestó un comportamiento irregular que provocó que los compuestos reducidos ocuparan 47 % del total.

En esta localidad, asimismo, los altos valores de compuestos oxidados que se manifiestan en los últimos años pueden provocar efectos de corrosión, los cuales causan daños a los materiales. La deposición

de contaminantes acidificantes sobre los materiales, a menudo, incrementa dramáticamente las tasas de deterioro. Muchos tipos diferentes de materiales son afectados, entre estos, los metales, las superficies pintadas, las rocas calcáreas, el yeso, los polímeros y papeles; estos materiales pueden ser encontrados en edificaciones y infraestructuras que, en los países industrializados constituyen cerca de 50 % del capital real. La acidificación del suelo y las aguas conlleva aumentos en la corrosión de instalaciones soterradas y tuberías, y pueden, incluso, afectar las fuentes de agua potable (Zhao and Xiong, 1988 y Kucera and Fitz, 1995).

Los valores encontrados de deposición en esta estación también pueden estar provocando impactos negativos sobre los ecosistemas, acidificando los suelos, las aguas superficiales (ríos, lagunas, embalses y lagos) y subterráneas, provocando la pérdida de la biodiversidad y otros efectos sobre los materiales y el medio ambiente (Luttermann, A., and Freedman, B., 2000). De igual modo, pueden provocar, en el caso de las aguas superficiales, la disminución del ión bicarbonato y el incremento de las concentraciones del nitrato, lo cual produce un aumento de las concentraciones de algunos metales en las aguas.

Conclusiones y recomendaciones

Los valores medios mensuales encontrados de las concentraciones de NO_2 , NO y NH_3 en las estaciones con características rurales presentan valores similares a los reportados en los Estados Unidos, Inglaterra y Japón. Las estaciones con cierta influencia urbana (Casablanca y Santiago de Cuba), por lo general, exhiben valores medios mensuales superiores.

El comportamiento anual de las concentraciones medias mensuales del aerosol de nitrato en las estaciones con influencia rural presenta un comportamiento similar al NO_2 , aunque con menos contraste entre sus valores, mientras que para el aerosol de amonio en las estaciones de Colón y Falla presentan los valores más altos, los cuales son el resultado de la fuerte influencia de actividad agropecuaria desarrollada en sus cercanías.

Los valores de nitrato en la precipitación se encuentran entre 0,3 mg/l y 2,1 mg/l. Las estaciones La Palma, Colón, y Falla ostentan un rango de variación más amplio en las concentraciones (0,5 mg/l-2,1 mg/l). La estación Casablanca muestra valores más altos de concentración (0,7 mg/l-1,6 mg/l) con respecto a Santiago de Cuba (0,3 mg/l-0,7 mg/l).

Las concentraciones de amonio en la precipitación en Cuba oscilan entre 0,4 mg/l y 2,3 mg/l. En las estaciones con características rurales, las concentraciones son diferentes (0,4 mg/l-2,3 mg/l). Estos valores son similares a los reportados por las estaciones de monitoreo de La Florida (Miami y Tampa), perteneciente a la red del Programa Nacional de Deposition Atmosférica de los Estados Unidos.

Entre las estaciones rurales, la estación Colón presentó los mayores valores de deposición, así como también las mayores deposiciones de los compuestos oxidados, los cuales pueden estar provocando efectos nocivos sobre el medio ambiente.

Entre las estaciones urbanas, Casablanca presenta las mayores deposiciones, mientras que Santiago

de Cuba exhibe un mayor contenido de compuestos oxidados; por tanto, dadas las características del suelo en esta localidad pueden estar presentándose efectos nocivos potenciales.

Los valores de deposición de los principales compuestos de nitrógeno encontrados en las estaciones estudiadas pueden estar provocando, potencialmente, efectos en la acidificación de las aguas superficiales (embalses y lagos), los suelos y los bosques. Los estudios de los efectos producidos por la deposición ácida deben realizarse de forma integrada y armónica entre los diversos especialistas relacionados con la protección del medio ambiente y los recursos naturales, puesto que es la única manera de preservar el equilibrio ecológico y la biodiversidad que requiere nuestro planeta.

Las recomendaciones más importantes derivadas de este trabajo son el mantenimiento y la ampliación de la red de monitoreo actual de los principales compuestos de nitrógeno, con la finalidad de conocer la tendencia de las concentraciones y deposiciones en nuestro país, así como su comportamiento futuro, y poder enfrentar el reto de la conservación del medio ambiente atmosférico. Además, es necesario profundizar en la dependencia de las concentraciones de estos compuestos con las variables meteorológicas y las situaciones sinópticas para conocer en detalle el clima químico del nitrógeno atmosférico en estas localidades. Asimismo, es recomendable realizar algunos estudios relacionados con las concentraciones y deposiciones de estos contaminantes a nivel local en lugares donde existan grandes problemas con la calidad del aire.

Referencias bibliográficas

- Álvarez L, 2006, *Estudio de la localización espacial de las tormentas eléctricas en Cuba y su tendencia*, tesis, UDICT, Instituto de Meteorología, 149 pp.
- Appel, BR 1980, 'Simultaneous nitric acid, particu-

Comportamiento de las concentraciones y deposiciones de los principales compuestos de nitrógeno atmosférico en el clima tropical húmedo

- late nitrate and acidity measurement in ambient air', *Atmosphere Environ*, vol. 14, no. 5, pp. 549-554.
- Ayers, GP, 1995, 'Deposition of acidic species at rural location in New South Wales, Australia. Water', *Air and soil Pollution*, vol. 85 pp. 2089 - 2094.
- Cadle, SA 1985, 'Seasonal variations in nitric acid, nitrate strong aerosol activity and ammonia in a urban area', *Atmosphere Environ*, vol. 19, no. 1, pp. 181-188.
- CETESB, 2005, *Relatório de Qualidade do Ar no Estado de Sao Paulo -2004, Secretaria de Meio Ambiente, Serie Relatórios*, Sao Paulo, consultado Junio 5 2011, (<http://www.ceteps.sp.gov.br>).
- Cuesta Santos, O, Collazo, A, González, M & Wallo, A 2006, *Humid and dry nitrogen 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.
- 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, INSTE La Habana, 102 pp.
- Cuesta, O, Collazo, A, Wallo, A, Labrador, R, González, M & Paulo Ortiz, O 2001, 'Atmospheric nitrogen compounds deposition in sumid tropic - Cuba', *TheScientificWorld* e-journal), consultado, Junio 4, 2011, www.thescientificworld.com.
- Cuesta, O, González, M, Ortiz, P y Collazo, A 1998, 'La Deposición por Nitrógeno Atmosférico en Cuba. Impactos Potenciales Vinculados al Cambio Global', en *Memorias publicadas en Soporte Magnético durante el V Congreso Interamericano sobre Medio Ambiente*, CIMA'98, Noviembre 17-20, 1998, ISPJAE, La Habana, Cuba.
- EEA 2008, *European forests-ecosystem conditions and sustainable use. EEA Report No 3/2008*, European Environment Agency, Kongens Nytorv 6, 1050 Copenhagen K, Denmark, pp.
- Fischer, R, Mues, V, Ulrich, E, Becher, G & Lorenz, M 2007, 'Monitoring of atmospheric deposition in European forests and an overview on its implication on forest condition', *Applied Geochemistry*, vol. 22 pp. 1129-1139.
- Fukino, H, Mimura, S, Inove, K & Yamane, Y 1984, 'Correlations among Atmospheric elements airborne particulate matter, benzene extracts, benzo (a) pyrene, NO, NO₂, SO₂, concentrations in Japan', *Atmospheric Environment*, vol. 18, no. 11.
- Galloway, JN, Aber, JD, Erisman, JW, Seitzinger, SP, Howarth, RH, Cowling, E et al. 2003, 'The nitrogen cascade', *BioScience*, vol. 53, pp. 341-356.
- Galoway, J 1995, 'Acid deposition: Perspectives in time and space', *Water, Air and Soil Pollution*, vol. 85, no.1, pp.15-24.
- Holland, EA 1996 *The spatial distribution of atmospheric nitrogen deposition and its impact on carbon uptake by terrestrial ecosystems*, (Submitted to JGR-Atmospheres), viewed 27 Mayo, 2009, <http://nadp.sws.uiuc.edu/lib/>
- ICP Forests. International Co-operative 2008, *Programme on Monitoring and Assessment of Air Pollution Effects on Forest*, viewed 6 February, 2008, <http://www.icp-forests.org/>
- Institute of Terrestrial Ecology 1995, *Mapping and modelling of critical loads for nitrogen - a workshop report*, M. Hornung, M.A. Sutton and R. B. Wilsan, UK, 207 p.
- IPCC 2007, 'Summary for Policymakers. In: Climate Change, 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment', en *Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 18 p.
- Johansson, C, Rodhe, H & Sanhueza, E 1988, 'Emission of NO in a tropical savannah and cloud forest during the dry season', *J. Geophys. Res.*, vol. 93, pp. 7180- 7192.
- Kucera, V & Fitz, S 1995, 'Direct and indirect air po-

- llution effects on materials including cultural monuments', *Water, Air and Soil Pollution*, vol. 85, no.1, pp. 153-165.
- Logan, JA 1983, 'Nitrogen oxides in Troposphere: Global and regional Budgets', *Journal of Geophysical Research*, vol. 88, No. C15, pp. 10785 - 10807.
- López, C 2007, *Introducción a la gestión de la calidad del aire. Centro de Química y Contaminación Atmosférica*, La Habana, Cuba.
- López, C, González, M, Cuesta, O, Sánchez, P, Collazo, A, Wallo, A et al. 1998, *Informe Técnico la Deposición Acida Atmosférica a Nivel Regional en Cuba y Su Contribución al Riesgo de los Ecosistemas Terrestres*, INSMET, La Habana Cuba.
- Lorenz, M, Fischer, R, Becher, G, Mues, V, Siedling, W, Kraft, P & Nagel, DH 2006, 'Forest Condition in Europe', en Technical Report. UNECE, Geneva.
- Lövlblad, G & Erisman, J 1992, 'Critical loads for nitrogen: A workshop report', in *Lökeperg, Sweden*.
- Luttermann, A, & Freedman, B 2000, 'Risks to forest in heavily polluted regions', in *J. L. Innes & J. Oleksyn (Ed.), Forest dynamics in heavily polluted regions (pp. 9-26), Report No.1 of the IUFRO Task Force on Environmental Change*, CABI Publishing, UK.
- Martin, A & Barbaer, FR 1984, 'Acid gases and acid in rain monitored for over 5 years in a rural east - central England', *Atmospheric Environment*, vol.18, no. 9, pp. 1715 -1724.
- Matson, P, Lohse, K & Hall, S 2002, 'The globalization of nitrogen: consequences for terrestrial ecosystems', *Ambio*, vol.31, pp.113-119.
- NNUU 1999, *Strategies and policies for air pollution abatement*, ECE/EB.AIR/65, New York and Geneva.
- NNUU 1991, *Assessment of long range transboundary air pollution. Air pollution studies No. 7*, New York.
- Prospero, JM, Jennings, SG 1996, 'The Atmospheric/Ocean Chemistry Experiment: AEROCE', en *IGAC Activities News Letter*, no. 7, December, 3-7, 1996.
- Prospero, JM, Jennings, SG 1997, 'The Atmospheric/Ocean Chemistry Experiment: AEROCE', en *Global Change News Letter*, March, no. 29, 9-12, 1997.
- SEI 1998, *Contaminación Atmosférica Regional en los Países en Desarrollo. Documentos de apoyo para los diálogos de acción política, América Latina*, Stockholm Environment Institute, Sweden, p. 134.
- Sánchez, P, Roque, A, Comas, R, Wallo, A, y Colas, JA 1998, 'Presencia del SO₂ en áreas urbanas y sus impactos potenciales en la salud', en *Memorias del V Congreso Iberoamericano de Medio Ambiente*, ISPJAE, La Habana, Cuba.
- Sánchez, P y Cuesta, O 2000, *Informe Científico: Evaluación de la deposición seca del SO₂ atmosférico en Cuba y sus efectos potenciales*, p. 36, Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba.
- Sommer, SG & Hutchings, N 1995, 'Techniques and strategies for the reduction of ammonia emission from agriculture', *Water, Air and soil pollution*, vol.1, pp. 237-248.
- Vitousek, PM, Aber, JD, Howarth, RW, Likens, GE, Matson, PA, Schindler, DW et al.1997, 'Human alteration of the global nitrogen cycle: Sources and consequences', *Ecological Applications*, vol. 7, no.3, pp 737 - 750.
- Wisley, TM, 1991 'Could Fossil - fuel emissions cause global warning?' *Nature*, vol. 349, pp 503 - 506.
- WMO 1986, 'WMP Report No. 17: Environmental pollution monitoring research programme No. 45', en *WMO - Technical Document no.151*, Geneva.
- WMO 1991, 'Meeting of experts on the role of clouds in the chemistry, transport, transformation and deposition of pollutants', en, WMO No. 448 (GEMS).
- WMO 2004, 'Manual for the GAW Precipitation Chemistry Programme - Guidelines, Data Quality Objectives and Standard Operating Procedures', en *WMO TD No. 1251*, Geneva.
- Zhao, D & Xiong, J 1988, 'Acidification in Southwestern China', in *Acidification in Tropical Countries*, H. Rodhe and R. Herrera John Wiley and Sons.