



Revista de Ciencias Ambientales (Trop J Environ Sci). EISSN: 2215-3896.

1996. Vol 12(1): 32-46.

DOI: <http://dx.doi.org/10.15359/rca.12-1.5>

URL: [www.revistas.una.ac.cr/ambientales](http://www.revistas.una.ac.cr/ambientales)

EMAIL: [revista.ambientales@una.cr](mailto:revista.ambientales@una.cr)

Carlos M. López Cabrera

# Revista de CIENCIAS AMBIENTALES Tropical Journal of Environmental Sciences



## Composición química y acidez de la lluvia: doce años de observaciones en Cuba

Chemical composition and acidity of the rain: twelve years of observations in Cuba

*Carlos M. López Cabrera*



Los artículos publicados se distribuyen bajo una Creative Commons Reconocimiento al autor-No comercial-Compartir igual 4.0 Internacional (CC BY NC SA 4.0 Internacional) basada en una obra en <http://www.revistas.una.ac.cr/ambientales>, lo que implica la posibilidad de que los lectores puedan de forma gratuita descargar, almacenar, copiar y distribuir la versión final aprobada y publicada (*post print*) del artículo, siempre y cuando se realice sin fines comerciales y se mencione la fuente y autoría de la obra.

# COMPOSICION QUIMICA Y ACIDEZ DE LA LLUVIA: DOCE AÑOS DE OBSERVACIONES EN CUBA

Carlos M. López Cabrera

## Resumen

Fueron analizadas las mediciones de la composición química y acidez de muestras de lluvia colectadas en base mensual durante el período 1981-1992 en ocho estaciones regionales del Instituto de Meteorología. Los resultados han revelado signos de problemas de lluvia ácida y grandes diferencias entre el comportamiento del  $\text{SO}_4^-$  y el  $\text{NO}_3^-$  en lluvia. El sulfato en la lluvia ha mostrado una tendencia al aumento de las concentraciones y mayor nivel de contaminación y valores de las anomalías. El análisis de la estructura y tendencia de las emisiones de S en Cuba demostró que esta no es la fuente principal para el comportamiento observado en la acidez y la deposición de  $\text{SO}_4^-$ . Algunas evidencias sugieren que este comportamiento está relacionado con cambios en las emisiones naturales y antropogénicas, unidos a la variabilidad climática, especialmente debida a las influencias del evento ENOS.

## Abstract

Measurements of the chemical composition and acidity of rain samples collected monthly during the period 1981-1992 in eight regional stations of the Meteorology Institute were analyzed. Results have revealed acid rain problems and large differences between the behavior of  $\text{SO}_4^-$  and  $\text{NO}_3^-$  in

rain concentrations. Sulphate showed an incremental tendency, pollution levels and abnormal values. Analysis of S emissions structure and trend in Cuba demonstrated that it is not the principal source for the acid rain and  $\text{SO}_4^-$  deposition trends. Some evidences suggest that this behavior is related to natural and anthropogenic emissions united to the climate variability, specially for ENSO events.

## Introducción

A diferencia de las latitudes templadas, en las regiones tropicales y subtropicales persisten limitaciones en las bases de datos de química atmosférica que impiden la evaluación correcta de la deposición atmosférica de especies de importancia biogeoquímica. Como es conocido, los trópicos son una fuente importante de gases trazas, de los cuales una parte considerable procede de la quema de biomasa como las emisiones de hidrocarburos y óxidos de nitrógeno que provocan la producción fotoquímica de ozono y la acidez de la atmósfera tropical.

La región del Gran Caribe cubre un área de  $4.31 \times 10^6 \text{ km}^2$  y comprende doce países continentales que bordean la cuenca, así como catorce naciones insulares y siete territorios dependientes. Incluye también el medio marino del Golfo de México, del Mar Caribe y las áreas

adyacentes del Océano Atlántico, al sur de los 30° de latitud norte (PNUMA, 1989).

Hasta el momento, en esta región se ha brindado una mayor atención a los problemas que afectan los recursos marinos y costeros que a la contaminación y química atmosférica, actividad esta última que de forma sistemática ha sido acometida solamente por unos pocos países del área.

El propio Sistema de Vigilancia de la Atmósfera Global (VAG) de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), pese a los intentos, no ha logrado aquí alcanzar aún la cobertura adecuada de estaciones de monitoreo.

Esta situación coloca a la región del Caribe en desventaja en relación a otras zonas del planeta para poder hacer frente a las perturbaciones y cambios antropogénicos, climáticos y ambientales en curso y pronosticados, de una gran connotación especialmente para las islas dado el alto grado de endemismo en la flora, que les confiere elevado valor ecológico.

La isla de Cuba, ubicada en la zona central del Gran Caribe y de las grandes masas continentales que la rodean, resulta un sitio adecuado para la vigilancia de la expansión hacia las zonas tropicales de los problemas regionales de la contaminación del aire y también para evaluar los impactos de los depósitos atmosféricos de acidificantes y tóxicos sobre los ecosistemas terrestres y marinos.

Se presentan en este estudio algunos resultados del monitoreo de la composición química de la lluvia a nivel regional en Cuba entre 1981 y 1992, con especial referencia a la acidez y a las especies contaminantes de mayor influencia en este problema ambiental.

### **Materiales y métodos**

Se utilizan datos de la composición química de la lluvia del período 1981-1992 obtenidos en ocho estaciones de monitoreo de la contaminación atmosférica que forman parte de la red del Instituto de Meteorología de Cuba (Fig. 1). En general se siguieron las instrucciones para la toma de muestras, aseguramiento de la calidad y análisis químico recomendados para la red BAPMoN y el Sistema VAG de la OMM (WMO, 1988; 1992; 1993).

Las muestras de lluvia son del tipo sumatoria mensual, que excluyen deposición seca para que sean representativas del nivel regional. Se utilizaron colectores de polietileno blanco operados manualmente por los observadores permanentes de las estaciones. Momentos antes del comienzo de la lluvia, los colectores fueron enjuagados varias veces con agua bidestilada.

Las muestras, hasta su envío al laboratorio central, fueron guardadas en botellas de polietileno blanco y colocadas en refrigeración en condiciones de oscuridad. No se adicionaron biocidas u otras sustancias para preservar las muestras.

Los análisis químicos (aniones y cationes principales, pH y electroconductividad) se realizaron en el laboratorio central de la red de monitoreo del Instituto de Meteorología. En la Tabla 1 se exponen los métodos y técnicas analíticas empleados.

Para el control de calidad se utilizaron los criterios presentados por Santroch (1993) para la aplicación de los métodos de balance iónico y balance de conductancia específica, al igual que se efectuaron depuraciones de datos extremos espurios. Se verificó la homogeneidad de las series mediante el criterio no paramétrico de las series de secuencias, y se salvaron lagunas aplicando el método de las diferencias con estaciones cercanas cuya homogeneidad no ofrecía duda.

### **Resultados**

#### **Composición química de la lluvia**

En la Tabla 2 se expone un resumen de los valores medios de la composición química de la lluvia obtenidos en ocho estaciones de monitoreo durante el período 1981-1992. Resaltan aquí los altos valores de  $\text{SO}_4^-$  especialmente en Casablanca. Esta estación, por su ubicación puede considerarse suburbana y se encuentra muy influida por las emisiones antropogénicas de la ciudad de La Habana.

Las estaciones La Palma (en el occidente de Cuba) y Pinares de Mayarí (en zonas montañosas del oriente del país), alejadas de las fuentes antropogénicas potentes, reflejan los menores valores de concentración y aunque pueden considerarse también altos, están en mejor correspondencia con otros obtenidos en zonas

Tabla 1. Técnicas analíticas utilizadas en el análisis de las muestras de lluvia.		
Elemento	Técnica	Equipo
2- - + SO <sub>4</sub> , NO <sub>3</sub> , NH <sub>4</sub>	Fotocolorimetría	KFK - 2T
- - Cl, HCO <sub>3</sub>	Volumétrico	"
+ + Na, K	Absorción Atómica Fotometría de Llama	PU SP - 9 PFM
2+ 2+ Ca, Hg	Absorción Atómica	PU SP - 9
pH	Medidor digital de pH	PRACITRONIC MV 870
X	Celda de conductividad	METROM 644

Tabla 2. Composición química de la lluvia en diferentes zonas de Cuba (mg/L).											
	*	-	-	+	+	+,	2+	2+			
Estación	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> *	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	pH
La Palma	1.4	3.9	0.4	2.9	0.5	1.6	0.3	1.1	0.5	13.0	5.4
S. Vegas	2.7	3.8	0.7	4.8	0.6	1.5	0.2	1.5	0.5	17.2	5.8
Colón	2.9	4.9	0.6	7.3	1.2	2.0	0.4	2.0	0.8	22.6	5.7
J.Grande	3.0	5.1	0.5	9.2	1.4	1.4	0.4	1.8	0.4	23.6	5.6
T.Collantes	2.7	5.1	0.9	5.8	0.7	1.4	0.3	1.8	0.3	19.3	5.3
Palo Seco	2.1	4.0	0.7	3.1	0.7	1.4	0.2	0.9	0.5	13.9	5.0
P.Nayari	1.4	4.6	0.7	3.6	0.9	1.2	0.2	1.2	1.0	15.4	5.4
X	-	electroconductividad (µS/cm)									
*	-	exceso									

cercanas a Cuba, por ejemplo, los reportados en las estaciones de los Estados Unidos de América ubicadas en las costas del Golfo de México y en los estados del SE de ese país (National Atmospheric Deposition Program, 1993).

En los valores de  $\text{SO}_4^-$  reportados no se excluyen algunas deficiencias reconocidas para la técnica fotocolorimétrica en la determinación de esta especie contaminante en la lluvia.

Para el caso del  $\text{NO}_3^-$  se obtuvieron menores concentraciones y mayor homogeneidad y además una correspondencia adecuada con los valores encontrados para la región del Gran Caribe en los EUA (National Atmospheric Deposition Program, 1993).

Por su vínculo con los depósitos ácidos, los ciclos regionales biogeoquímicos de esos dos elementos vienen recibiendo una atención destacada desde hace años, especialmente en América del Norte y Europa. Para el azufre, importantes perturbaciones se originan debido a las grandes emisiones que se producen en las regiones industrializadas de las zonas anteriormente señaladas (muy superiores a las naturales). Para las regiones intertropicales se considera a la descomposición de la biomasa como la fuente principal para este elemento (Rodhe y Herrera, 1988).

Pese a los elevados volúmenes de emisión de estas especies, la acción de las precipitaciones como un efectivo proceso de remoción ha evitado que aumenten su concentración en la atmósfera aunque estas son un factor importante para su traslado hacia otros medios como suelos, aguas, etc., donde pueden ocasionar grandes efectos en los ecosistemas.

En la Fig. 2 se presenta el comportamiento de las concentraciones de sulfato exceso y nitrato en la lluvia a nivel general en Cuba para el período 1982-1992. Se pueden apreciar en ellas las diferencias notables tanto al nivel de contaminación como en la forma de variación entre estas dos especies contaminantes.

De acuerdo con López (1994a,b), para el  $\text{SO}_4^-$ , las anomalías positivas de los años 1984, 1987 y 1989, se perciben no solo en la ocurrencia de altos valores medios de concentración, sino también

en el marcado cambio cualitativo del nivel de contaminación de la lluvia. La evaluación de este nivel mediante el Índice de Contaminación General del Aire IL (López, 1993) verificó reducciones notables de la frecuencia de casos de nivel de fondo global en los años citados anteriormente y un empeoramiento general de la calidad del medio ambiente atmosférico para este elemento. Por otra parte, el nitrato reflejó menor nivel de contaminación que el sulfato y mayor homogeneidad en los grados de contaminación tanto espacial como temporalmente. En la Fig.3 se muestra un resumen de la frecuencia de casos del nivel de contaminación de la lluvia para estos elementos a nivel general en Cuba. Se incluye también en esta al  $\text{NH}_4^+$ , para el que predomina el nivel regional moderado pero se presentan con alta frecuencia también casos de mucho mayor nivel y grado de contaminación, incluyendo el nivel de impacto.

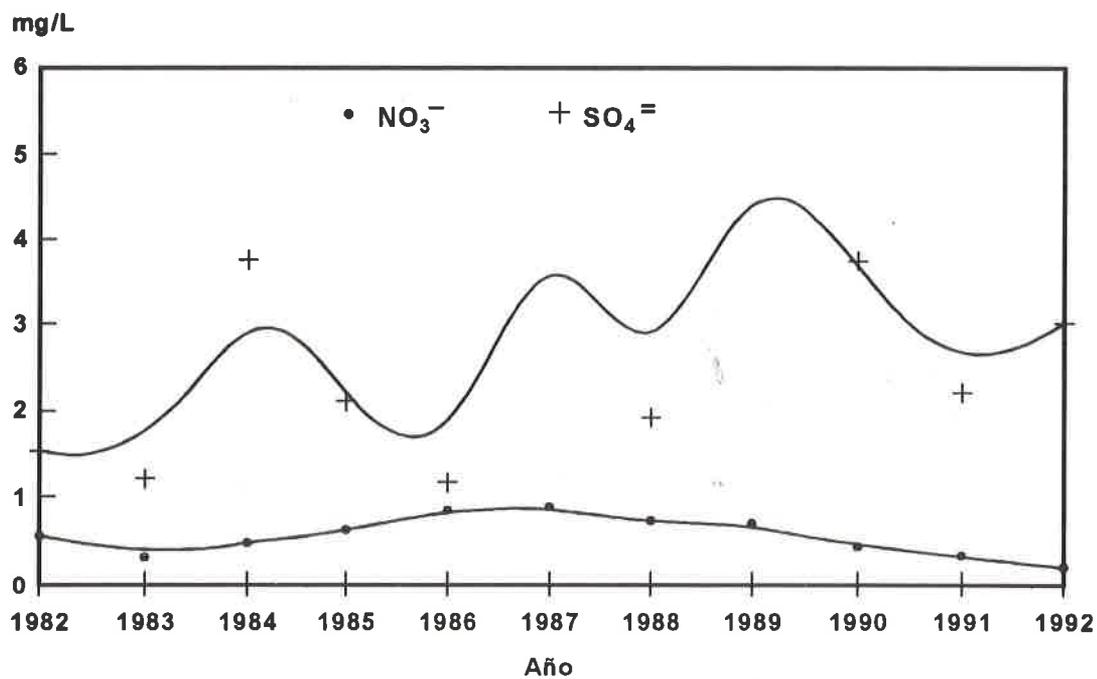
El análisis temporal de estas frecuencias verificó que la ocurrencia de casos de fondo global guarda una relación inversa con el comportamiento de las actividades principales de la economía cubana en el período, que generan emisiones de contaminantes a la atmósfera.

Dado que la cobertura de las estaciones utilizadas es homogénea temporalmente pero no espacialmente, para evaluar influencia de esta inhomogeneidad se analizaron las tendencias para todas las estaciones, las cuales en su mayoría reflejaron un comportamiento cercano al general, como puede apreciarse en mayor detalle en el ejemplo de la Fig. 4, correspondiente a la estación La Palma y que como fue señalado anteriormente, refleja con mejor calidad el nivel regional de contaminación del aire en el país.

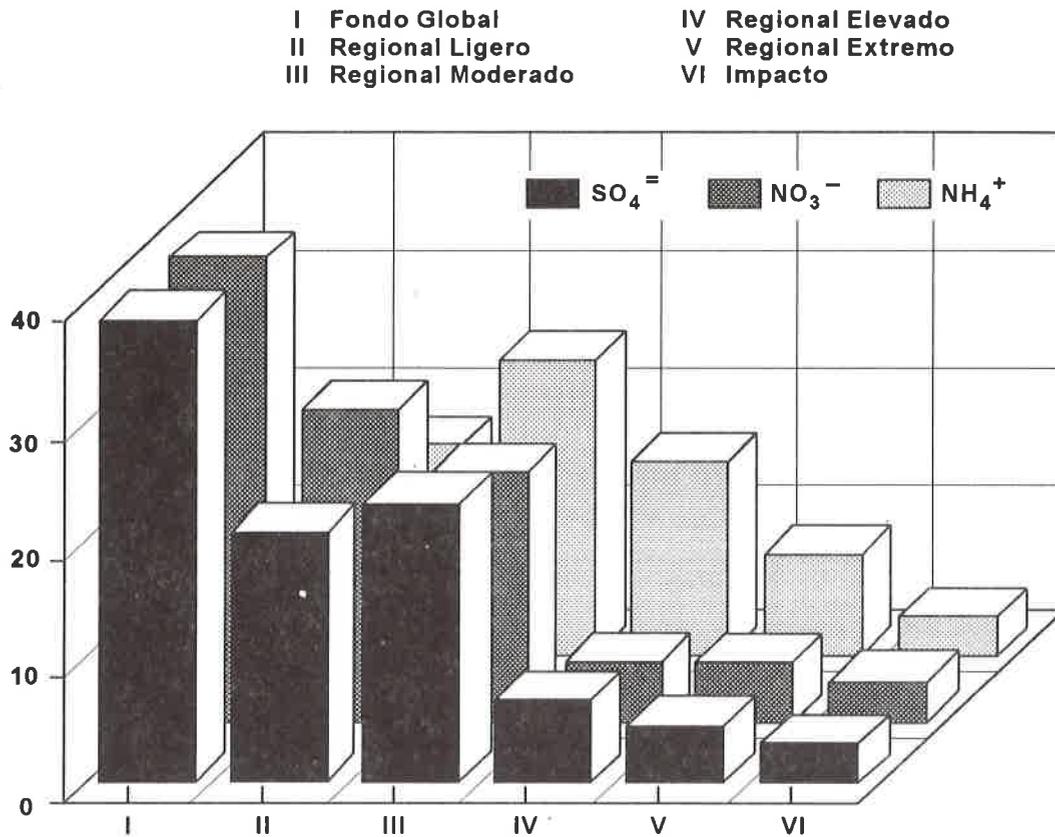
Las insuficiencias reconocidas para la técnica fotocolorimétrica y la utilización de muestras sumarias mensuales puede contribuir a la detección de valores algo superiores a los reales para el sulfato, pero no explican las tendencias al incremento ni las perturbaciones observadas en determinados períodos y que también se aprecian en la Fig. 4.



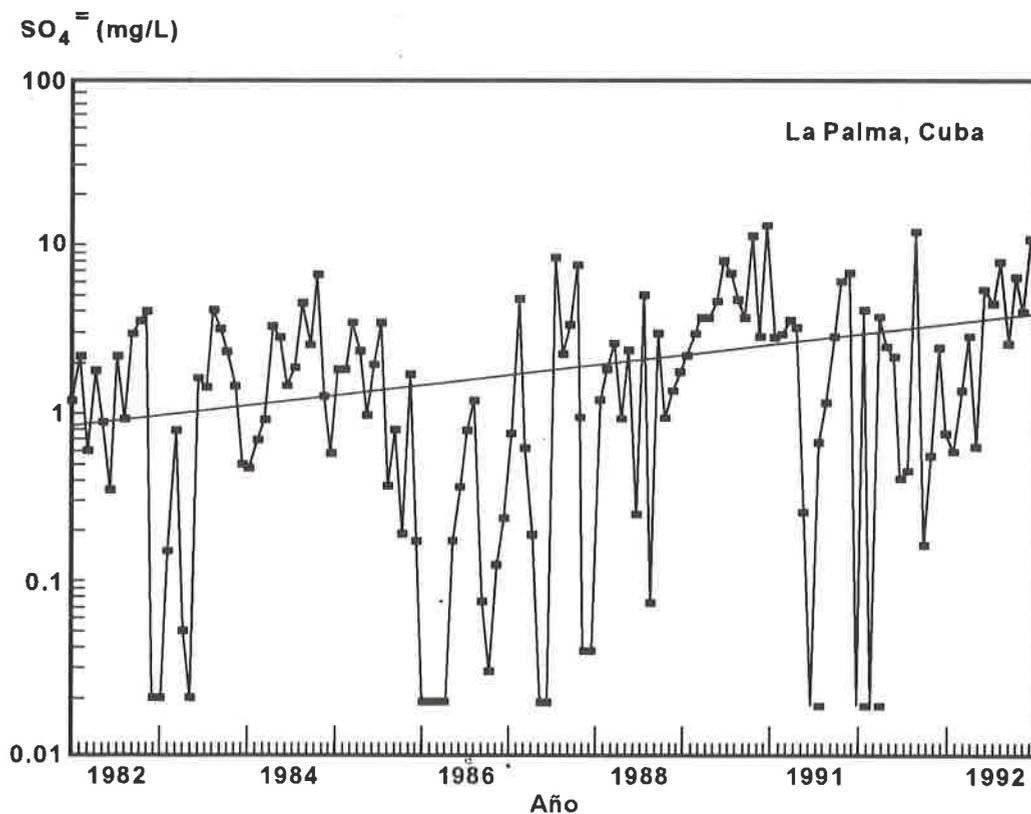
**Fig. 1. Red de monitoreo de la contaminación general del aire en Cuba**



**Fig. 2. Tendencia del  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4=$  en la lluvia ácida a nivel general en Cuba. Medias ponderadas en volumen.**



**Fig. 3. Frecuencia de casos del nivel de contaminación de la lluvia a nivel general en Cuba, 1981-1992.**



**Fig. 4. Comportamiento del valor mensual del  $\text{SO}_4^{=}$  en la lluvia**

### Acidez en la lluvia

La lluvia ácida, por sus repercusiones ambientales, es uno de los problemas regionales de contaminación atmosférica que mayor atención ha recibido en las últimas décadas.

La acidez de la lluvia se vincula con la remoción de contaminantes de la atmósfera que, cuando se disuelven en agua, alteran las concentraciones de  $H^+$  o de aniones en la solución. Los más importantes de estos, además del ión hidrógeno, son los óxidos de azufre y nitrógeno, aniones de ácidos fuertes ( $SO_4^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $Cl^-$ ), amonio ( $NH_4^+$ ) y otros cationes.

Normalmente, mediante las mediciones del pH de la lluvia se obtiene información acerca de la acidez libre debido a la presencia de los iones  $H^+$  libres en la solución y que provienen de la disociación total de los ácidos débiles, algunos óxidos metálicos como los de aluminio y hierro (Galioway et al., 1982) y también sales como el  $NH_4HSO_4$  (Sequeira, 1981).

Durante mucho tiempo se dio por supuesto que, en las regiones alejadas de las fuentes antropogénicas de contaminación, el pH de las precipitaciones alcanzaba valores próximos a 5.6, que corresponde al de la solución débil de ácido carbónico que se forma en el agua de las nubes o de lluvia a condición de que haya un equilibrio con las concentraciones atmosféricas de  $CO_2$ .

Aunque ese valor ha resultado útil como referencia, en la actualidad se ha comprobado que la química de las precipitaciones de lugares remotos puede ser afectada por sustancias ácidas de procedencia diversa, hasta alcanzar valores del pH que se sitúan cercanos a 5.0 (WMO, 1989).

La formación de la lluvia ácida debe entenderse como un proceso de relación (proporción) entre los ácidos fuertes y débiles presentes en la lluvia por un lado y por otro, la cantidad de elementos alcalinos que actúan como neutralizantes.

Estas proporciones originan, para los valores remotos, diversos valores medios de pH que también deben entenderse como naturales.

Varios procesos condicionan la acidificación de la lluvia en zonas alejadas de las fuentes contaminantes pero entre los de mayor

importancia se incluyen el transporte a largas distancias de aerosoles acidificantes y las contribuciones de especies donantes de protones provenientes de fuentes naturales y antropogénicas en la región.

La intensidad de la acidez está influida por la proporción que existe entre los ácidos minerales y los ácidos débiles (principalmente los orgánicos), así como por el desbalance de las relaciones iónicas.

Aunque los valores medios del pH presentados en la Tabla 2 pueden considerarse como normales, en los últimos años la frecuencia de casos de lluvia ácida en Cuba se ha incrementado notablemente (López, 1944 a,b). Un ejemplo de esta situación se expone en la Fig. 5 a,b.

La ocurrencia de valores de pH inferiores a 5.0 (28.6%) en el período 1987-1992 resultó ser un 14.8% superior a la del período 1981-1986 y el intervalo de mayor frecuencia de casos se desplazó desde 5.6-6.0 hacia 5.1-5.0.

Varios (y de distinta índole) son los factores que influyen sobre los valores de la acidez de la lluvia como se mencionó anteriormente. Específicamente, sobre la tendencia y las perturbaciones en las concentraciones se identifican dos de estos como los de mayor importancia y que son, los cambios en las emisiones y sumideros de las sustancias acidificantes o neutralizantes y la variabilidad climática.

A continuación se analizan brevemente algunos de estos factores.

### Contribución potencial de los ácidos inorgánicos a la acidez libre de la lluvia

Una vía para determinar la posible contribución de los aniones ácidos fuertes a la acidez libre es mediante el análisis de las razones equivalentes  $SO_4^-/H^+$ ,  $NO_3^-/H^+$  y  $Cl^-/H^+$  (Galloway et al., 1982; Sanhueza, et al., 1989).

Si estas razones equivalentes son menores que 1, ninguno de los aniones es suficiente para proveer toda la acidez libre. Si la suma de las razones es menor que 1, entonces todos los aniones ácidos fuertes no son suficientes para explicar la acidez libre encontrada, situación que puede ser provocada por la influencia de los otros contribuyentes, especialmente los ácidos débiles.

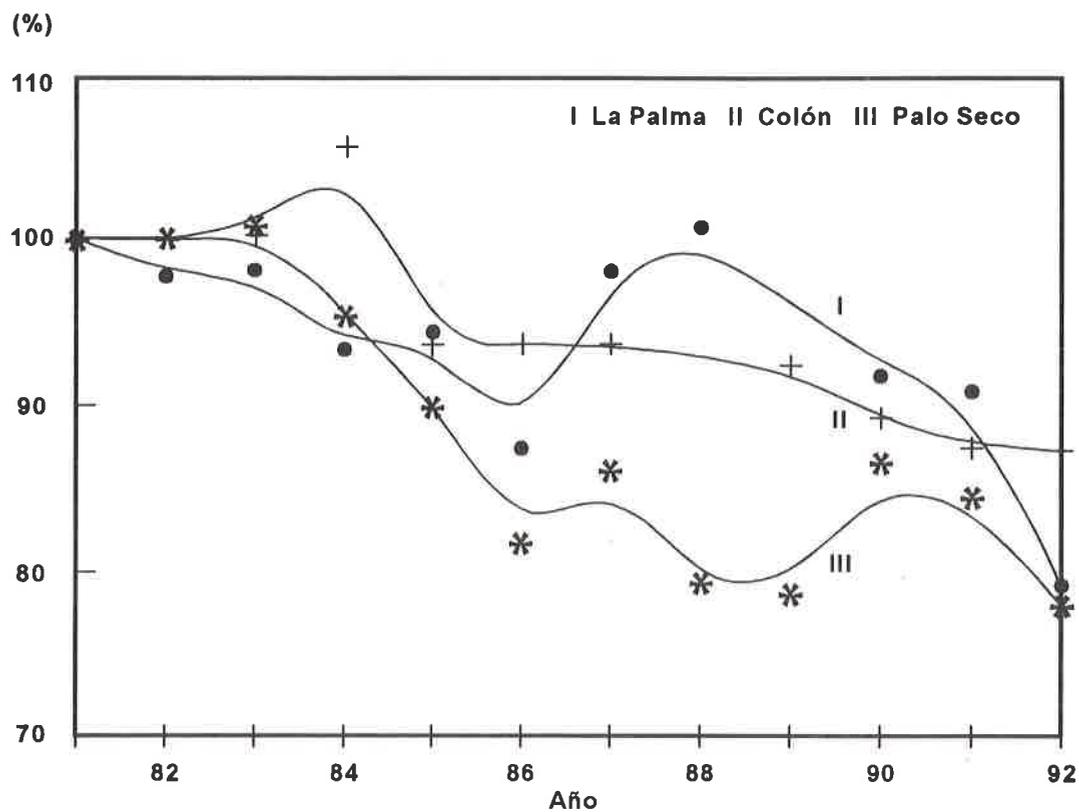


Fig. 5a. Tendencias en la acidez de la lluvia

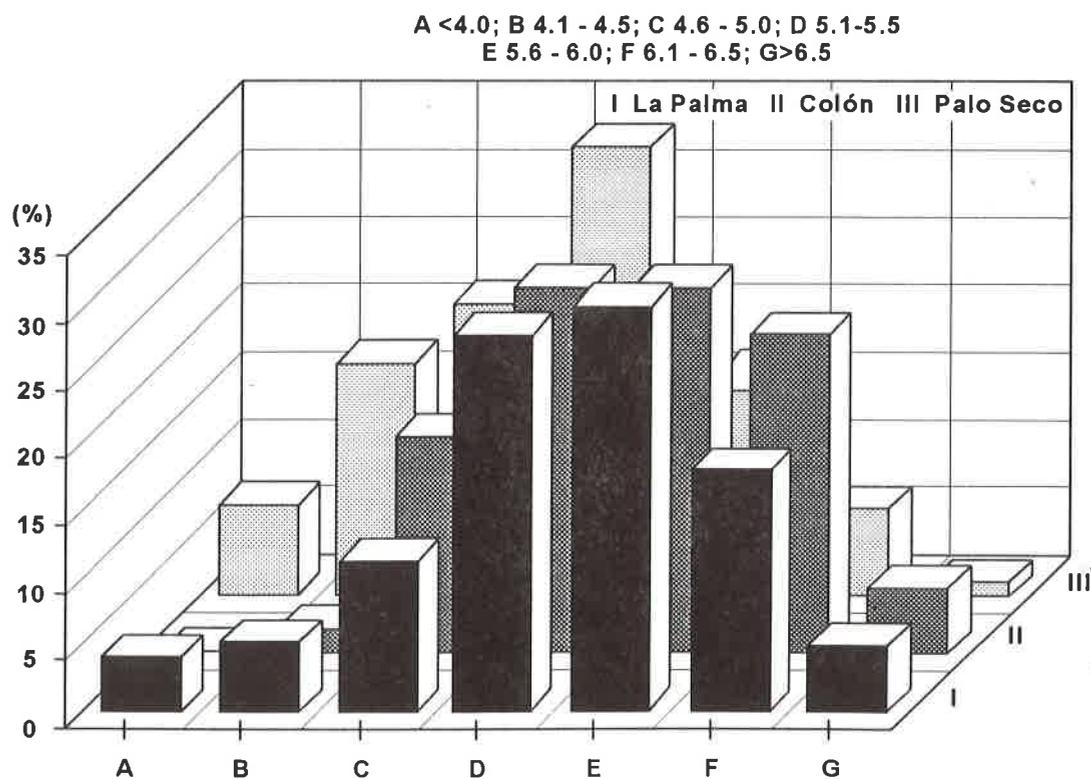


Fig. 5b. Frecuencia relativa de valores de pH de la lluvia.

En la Tabla 3 se exponen las posibles contribuciones de los aniones inorgánicos a la acidez libre en diferentes estaciones de la red de monitoreo calculadas a partir de las medias anuales del período 1981-1992.

Como se observa, estas relaciones son notablemente superiores a la unidad y por supuesto también sus sumas. Esto pudiera ser debido a las influencias de sales neutras como el  $MgSO_4$ ,  $CaSO_4$  y  $NH_4NO_3$  que provocan elevadas concentraciones de aniones ácidos en las muestras (Sequeira, 1981).

Dichas relaciones resultaron especialmente altas para el  $SO_4^-$  y el  $Cl^-$  pues para el  $NO_3^-$  los valores se alejan mucho menos del valor uno. Dadas las características de la isla de Cuba y la distribución de sus zonas industriales y urbanas, resulta difícil la ubicación de puntos de monitoreo que complementen algunos de los requisitos para su clasificación como remotos, especialmente en lo relativo a la no ubicación de fuentes potentes de contaminación (industriales o urbanas) en un radio de 1000 km alrededor de estos puntos, de acuerdo a los criterios utilizados en el Proyecto Global de Química de las Precipitaciones (Galloway et al., 1982). Esto hace que los resultados de las estaciones cubanas reflejen, en lo fundamental, problemas regionales de la contaminación del aire en las diferentes zonas de Cuba.

Otros aspectos que pueden haber influido sobre las concentraciones detectadas son la utilización de muestras sumarias mensuales y valores de pH medidos en el laboratorio (a los 30-45 días posteriores al mes de colección).

Como es conocido, normalmente la acidez libre de las precipitaciones disminuye entre los sitios de monitoreo y los laboratorios si estas muestras no han sido preservadas por un biocida (NADP, 1979; Rothert y Dana, 1983; Keene et al., 1983; Keene y Galloway, 1984) como es el caso de las utilizadas en este estudio y que constituye un factor que contribuye a la utilización de menores valores de ( $H^+$ ) en las relaciones señaladas en la Tabla 3.

Entre las causas principales para esta disminución de la acidez libre se ha señalado el consumo de los ácidos orgánicos por microbios antes de que se efectúe el análisis en el laboratorio

central. Este cambio en la acidez libre ha sido utilizado también para estimar la acidez de los ácidos orgánicos disociados en las precipitaciones (Keene y Galloway, 1984).

#### **Factores que influyen sobre la marcha de las concentraciones y la acidificación**

Dos factores se reconocen entre los dos de mayor influencia sobre las variaciones observadas en la marcha de las concentraciones de elementos en la lluvia y su acidez: los cambios en las emisiones y sumideros y la variabilidad climática. Entre tales casos, se analizan a continuación los de mayor peso para el azufre, dado que este elemento es el que presentó anomalías positivas significativas en el nivel de contaminación durante el período de estudio.

#### **Emisiones antropogénicas de azufre**

En las principales zonas emisoras del hemisferio norte las emisiones antropogénicas de  $SO_2$  crecieron hasta el final de los años 70 y posteriormente comenzaron a disminuir debido a la recesión económica, a la crisis del petróleo, así como a las negociaciones internacionales como consecuencia de los efectos reconocidos de la lluvia ácida y la contaminación transfronteriza.

En Cuba, en una buena parte del período que se analiza, el gasto de energía aumentó sistemáticamente como resultado del incremento de la cantidad, complejidad y diversidad de la producción y los servicios en el país (Pons, 1988). En los últimos años, dificultades económicas y otras causas provocaron una sustancial reducción de las importaciones y del uso de combustibles fósiles.

Unido a los aspectos señalados anteriormente, otros factores importantes para el análisis de la marcha de las emisiones de azufre en el país son la incorporación del petróleo crudo nativo y la eliminación del consumo de petróleo en la fabricación de crudos en la industria azucarera.

Este petróleo nativo de alto contenido de azufre se ha empleado fundamentalmente en la generación de energía eléctrica, la fabricación de cemento y de aceites básicos para la producción de lubricantes.

Tabla 3. Contribución relativa del  $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{NO}_3^-$  a la acidez de la lluvia en diferentes sitios de Cuba, para el período 1981-1992.

Estación	$\frac{-}{+} \text{SO}_4 / \text{H}$	$\frac{-}{+} \text{Cl} / \text{H}$	$\frac{-}{+} \text{NO}_3 / \text{H}$
La Palma	7.29	7.19	1.61
Casablanca	33.3	22.9	3.87
S. Vegas	33.08	18.25	6.64
Colón	30.2	18.3	4.84
J. Grande	24.99	29.3	3.22
T. Collantes	11.24	14.7	2.9
Palo Seco	4.37	4.23	1.13
P. Nayari	7.29	16.9	2.82

En la Fig. 6 se ofrecen los estimados de las emisiones de dióxido de azufre a nivel general en Cuba a partir de sus fuentes principales (producción de electricidad, cemento, hierro, acero, procesamiento de petróleo y el transporte)(López, 1944 a).

Se aplica en la figura el peso dominante de la generación de energía eléctrica en estas emisiones así como el descenso que sufren las mismas a partir del año 1990.

El papel que sobre las emisiones desempeñan la disminución del uso del fuel oil tradicional y el incremento en el empleo del crudo nativo en las dos fuentes principales de su uso (generación de electricidad y fabricación de cemento), puede observarse con mayor detalle en la Fig. 7.

#### Emisiones naturales de azufre

Dada la ausencia de mediciones sobre la emisión de las fuentes naturales en Cuba y debido a las incertidumbres que persisten en este tema, se aplicaron, donde fue posible, criterios generales de

emisión utilizados en conocidos reportes sobre el tema como por ejemplo Whelpdale y Galloway (1979) y otros introducidos por el autor (López, 1994 a) que posibilitaron la aplicación del método de los balances. Para algunas de estas fuentes como los volcanes para los cuales no se pudieron abordar estimados cuantitativos, se analizó el posible papel que desempeñaron sobre las anomalías encontradas en la marcha de las concentraciones.

No existen volcanes en Cuba, pero sí en la región Caribe, fundamentalmente en Centroamérica y en el Arco de las Antillas. Como se sabe, después de un período referido como de condiciones de fondo, se produjo una etapa muy activa de erupciones al comienzo de los años 80.

Las dos erupciones más importantes del período 1981-1992 ocurrieron en latitudes tropicales. La erupción del volcán El Chichón en México (abril de 1982) concentró una fuerte capa de aerosoles entre los paralelos  $10^{\circ}$  S y  $30^{\circ}$  N durante ese propio año para después extenderse hacia el norte y posteriormente en la primavera de 1984 replegarse de nuevo hacia el sur.

La nube de esta erupción se propagó a los pocos días sobre Cuba, donde las estaciones de observación en superficie reportaron la presencia de una bruma atípica para este período (Mojena y García, 1984). Según estos autores, el descenso de la nube hacia superficie se produjo debido a la presencia de corrientes verticales descendentes producidas por el sistema anticiclónico que influía sobre el área. Estas condiciones no permitieron a la nube interactuar con sistemas productores de lluvia por lo que no aparece su repercusión en las muestras mensuales de lluvia de ese período.

En relación con la erupción del Monte Pinatubo en las Filipinas, mediciones LIDAR realizadas en el Centro Meteorológico de Camaguez (Antuña, 1993 a) verificaron la elevada concentración de aerosoles presentes en la estratosfera durante 1992 (incremento en la integral de retrodispersión en más de un orden de magnitud en relación a las condiciones de fondo entre los años 1988-1990).

Este autor (Antuña, 1993 b) encontró evidencias de una posible transmisión de parte de estos aerosoles desde la estratosfera a la troposfera sobre Cuba.

Entre las fuentes naturales, la producción biológica de azufre es quizás la más compleja de cuantificar, especialmente la transferencia mar-tierra vía, la atmósfera, de compuestos volátiles de azufre y otros compuestos reducidos de azufre, desde las zonas costeras cercanas a Cuba, lo que impide evaluar si las anomalías climáticas detectadas influyeron sobre esta fuente.

Resultados de mediciones de DMS en el Golfo de México ((Hoyt y Hoyt, 1988) verificaron valores medios para el agua de mar menores que los detectados en otras regiones ecológicamente productivas. En el aire las concentraciones obtenidas resultaron mucho menores también que los promedios calculados para otras regiones del Océano Pacífico pero no se descarta su papel en la acidificación de las nubes y la lluvia.

Los estimados de emisión de DMS a partir de los resultados de los autores citados son aproximadamente  $300 \mu\text{g}/\text{m}^2/\text{día}$  lo que corresponde a un flujo de 0.84 TgS por año.

### Variabilidad climática

La mayor contribución a la variabilidad interanual del sistema climático es provocada por el evento ENOS. Tanto las anomalías en la circulación general que se producen durante estos eventos, como los cambios originados en diferentes variables meteorológicas (temperatura, nubosidad, precipitaciones, etc.) pueden influir sobre las emisiones (especialmente biosféricas), así como sobre el proceso de transmisión atmosférica de las sustancias (reacciones químicas, remoción, difusión, transporte, etc.).

El período que analizamos fue notable desde el punto de vista climático. El evento ENOS caliente de 1982-83 fue quizás el más fuerte del siglo, mientras el evento frío 1988/89 fue uno de los mayores de los últimos 50 años. De acuerdo con la temperatura media global fue la década más caliente desde que se cuenta con estadísticas disponibles.

Existen evidencias de que en Cuba los efectos más notables del evento ENOS se producen sobre el régimen de precipitaciones (Cárdenas, 1991). Este autor verificó que los años anteriores al ENOS muestran mayoritariamente anomalías negativas de precipitación; los años posteriores anomalías positivas y los años de evento, positivas, negativas o cero anomalías.

Se encontró también (Cárdenas, 1991) que en el país hay una marcada disminución de estos efectos de oeste a este, es decir las mayores anomalías se presentan para la región occidental del país.

También se ha destacado que otra consecuencia importante que se observa es que dentro del año se altera totalmente el régimen de lluvia, produciéndose anomalías de signo contrario en los períodos lluvioso y seco del año.

Estos efectos sobre el régimen de precipitaciones pueden tener consecuencias para los procesos de remoción húmeda de los contaminantes, aunque como es conocido, sobre este tema existen criterios contrapuestos.

En el estudio fueron exploradas diferentes relaciones entre las concentraciones de sulfato exceso y nitrato en las precipitaciones y la cantidad de lluvia caída pero no se identificó con claridad algún tipo de dependencia. Sin embargo, se ha

### EMISIONES ESTIMADAS DE SO<sub>2</sub> EN CUBA

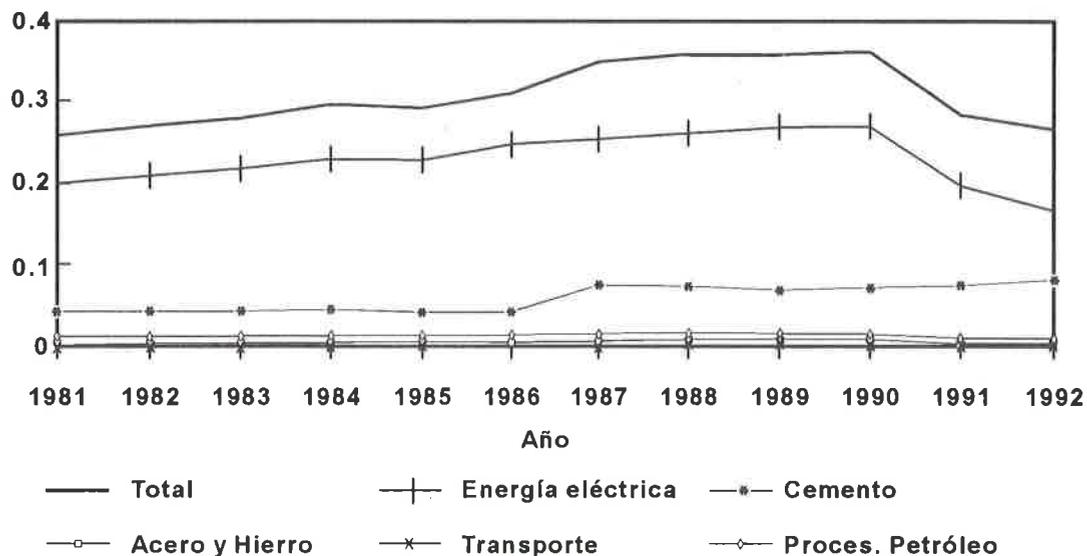


Fig. 6. Emisiones calculadas a partir de datos de producción y del uso de combustibles en varias fuentes tecnológicas

### EMISIONES ESTIMADAS DE SO<sub>2</sub> EN CUBA

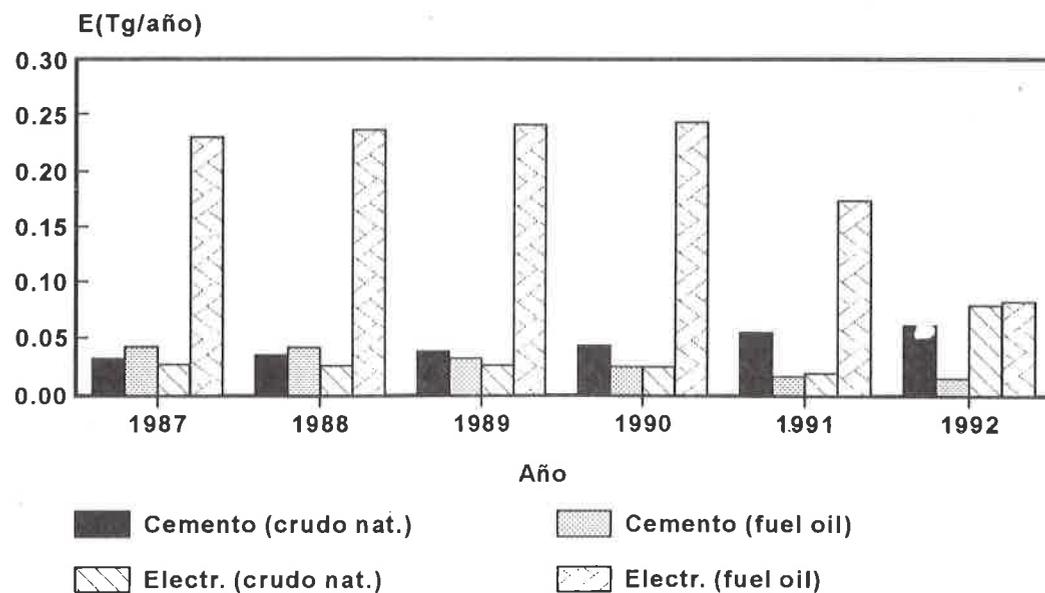


Fig. 7. Emisiones a partir de la generación eléctrica y la producción de cemento con crudo nativo y fuel oil

Tabla 4. Valores anuales de las anomalías de la concentración de sulfato exceso en lluvia para Cuba (a), estación La Palma (b) y signos de las anomalías de lluvia en la provincia de Pinar del Río (c).

Años	ENOS	a (mg/L)	b (mg/L)	c
1981	-1	-	-	-
1982	0	-1.25	-1.12	+
1983	+1	-1.58	-1.54	+
1984	+2	+0.97	-0.54	-
1985		-0.67	-1.28	-
1986	-1	-1.60	-2.58	-
1987	0	+1.81	-0.37	-
1988	+1	-0.84	-0.94	+
1989	+2	+2.43	+2.38	-
1990	0	+0.99	-0.88	-
1991	+1	-0.55	-0.15	+
1992	+2	-0.26	+1.00	+

notado una posible relación entre el ENOS y las concentraciones de sulfato en lluvia durante los últimos eventos, aunque la serie de datos de concentraciones es demasiado corta y solo permite señalar algunas ideas preliminares al respecto.

Las anomalías de concentraciones de  $\text{SO}_4^-$  en lluvia muestran un aumento positivo marcado en los años posteriores al del comienzo de estos eventos.

En la Tabla 4 se presentan las anomalías anuales de las concentraciones de sulfato en lluvia para Cuba en general y para la estación La Palma, ubicada en la provincia de Pinar del Río, junto a los signos de las anomalías de la lluvia total anual para

esa provincia (una de las zonas de Cuba donde las repercusiones del evento ENOS son identificadas con mayor claridad).

Durante 1989 y 1992 prácticamente todos los meses tuvieron anomalías positivas. El episodio caliente 1986-1987 fue seguido por uno de los episodios fríos más fuertes en los últimos 50 años (WMO-UNEP, 1992). En ese período, fueron observados en Cuba las mayores anomalías positivas de las concentraciones.

#### Conclusiones

A partir del análisis de la composición química y acidez de la lluvia en Cuba puede

concluirse que:

-Las concentraciones de sulfato exceso y nitrato muestran un comportamiento diferente, verificándose para el primero un mayor nivel de contaminación y variabilidad temporal y espacial, así como una tendencia hacia el incremento de los valores.

-Las concentraciones detectadas de sulfato exceso son superiores a las reportadas para sitios remotos del mundo, lo que verifica la influencia que ejercen los procesos regionales y las emisiones del país sobre las estaciones de monitoreo, sin excluir influencias de algunas deficiencias de la técnica analítica empleada para la determinación de este elemento. Contrario al sulfato, el nitrato verificó menor nivel de contaminación y una buena correspondencia con las concentraciones reportadas por estaciones de monitoreo cercanas a Cuba.

-Se considera que el nitrato en lluvia guarda una mejor relación con el comportamiento de las emisiones cubanas mientras que para el caso del sulfato exceso, aunque también se verifica esta relación, su comportamiento está influido por fuentes naturales y antrópicas (externas) así como por la variabilidad climática que provocan perturbaciones notables sobre las concentraciones durante períodos relativamente largos de tiempo.

-Aunque los valores medios del pH obtenidos pueden considerarse normales, en los últimos años la frecuencia de eventos de lluvia ácida se ha incrementado notablemente, desplazando el intervalo con mayor número de casos desde 5.6-6.0 hasta 5.1-5.6. Esta situación requiere de la vigilancia permanente, en Cuba y en otros países de la región, por las repercusiones nocivas que para el medio ambiente pudieran derivarse de continuar estas tendencias, además de poder verificar su manifestación espacial dentro de la misma.

-Al valorarse la contribución potencial de los ácidos inorgánicos a la acidez libre, se encontraron relaciones altas (muy superiores a uno) especialmente para el sulfato exceso y el cloruro, lo que pudiera deberse a la presencia de sales que provocan elevadas concentraciones de aniones ácidos y a la utilización de mediciones de pH tomadas en el laboratorio central al llegar las muestras a este a los 30-45 días de su recolección.

-La precisión de las causas y tendencias de la acidificación de la lluvia en Cuba no queda totalmente clara a partir de los estudios realizados hasta el momento y se requiere de su ampliación, especialmente hacia sectores no abordados, como por ejemplo la determinación de las concentraciones de los ácidos orgánicos, particularmente fórmico y acético.

## REFERENCIAS

ANTUÑA, J. C. 1993 a. Observaciones LIDAR de la Nube de la erupción del Monte Pinatubo, desarrolladas en el Centro Meteorológico de Camagüey. XI Reunión de la Comisión de Climatología de la OMM, La Habana.

ANTUÑA, J. C. 1993 b. Comunicación personal.

CÁRDENAS, P. 1991. Evento El Niño y Anomalías de Precipitación en Cuba. Informe de Resultado Científico, Instituto de Meteorología, La Habana, 24 p.

GALLOWAY, J. N., LIKENS, G. E., KEENE, W. C., y MILLER, J. M. 1982. The Composition of Precipitation in Remote Areas of the World. *J. Geophys. Res.*, Vol. 87, No. 11, 8771-8786, Oct. 20.

HOYT, D., y HOYT, L. H. 1988. Measurement of Dimethyl Sulfide in Air and Seawater. In: *Air Chemistry Studies Over the Gulf of Mexico*. F. Parungo and John Miller (Eds.). NOAA Technical Memorandum ERL ESG-29, 21-28.

KEENE, W. C., GALLOWAY, J. N. y HOLDEN, D. Jr. 1983. Measurement of weak Organic Acidity in Precipitation From Remote Areas of the World. *J. Geophys. Res.* Vol. 88, No. C9, 5122-5130, Jun 20.

KEENE, W. C. y GALLOWAY, J. N. 1984. Organic Acidity in Precipitation of North America. *Atm. Env.* Vol. 18, No. 11, pp. 2491-2497.

LÓPEZ, C. 1993. Regional Air Pollution Indices in Cuba. *Bull. WMO*, Vol. 42, No. 1, Jan, 39-44.

LÓPEZ, C. 1994 a. Evaluación de la Contaminación General del Aire en Cuba Mediante Algunos Indices. Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, La Habana. 130 pp.

LÓPEZ, C. 1994 b. Assessment of the Sulphur and Nitrogen Wet Deposition and Rain Acidity over the Central Caribbean Region. Evidence for Natural Fluctuations and Anthropogenic Perturbations. Joint 8th CACGP Symposium and 2nd IGAC Conference. Fuji-Yoshida, 5-9 Sep, 1994.

MOJENA, E. y GARCÍA, O. 1984. Propagación sobre Cuba de la Nube de Cenizas de la Erupción del Volcán Chichón. *Marz.Abr, 1982. Geof. Int.* Vol. 23-2, 143-153.

- NADP, 1979. Data Report Precipitation Chemistry, Third Quarter, 1979, Vol. II, no. 3 Natural Resource Ecology Laboratory, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- NATIONAL ATMOSPHERIC DEPOSITION PROGRAM. 1993. NADP/NTN Annual Data Summary. Precipitation Chemistry in the United States, 1992 Natural Resource Ecology Laboratory, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 480 pp.
- PNUMA, 1989. Perspectiva Regional sobre los Problemas y Prioridades Ambientales que afectan los Recursos Costeros y Marinos de la Región del Gran Caribe. Inf. Técnico del PAC No. 2. Programa Ambiental del Caribe del PNUMA, Kingston, Jamaica.
- PONS, H. M. 1988. Política energética, política económica y desarrollo. Ed. Política, La Habana, 103 pp.
- RODHE, H. y HERRERA, R. (Eds). 1988. Acidification in Tropical Countries. SCOPE 36, John Wiley and Sons, 405 pp.
- ROTHERT, J. E. y DANA M. T. 1983. MAP 35 Precipitation Chemistry Network: sixth periodic summary report (1982). Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington.
- SANHUEZA, E., ELBERT, W., RONDÓN, A., y CORINA M. 1989. Organic and Inorganic Acids in Rain from a Remote Site of the Venezuelan savannah. Tellus, 41B, 170-176.
- SANTROCH, J. 1993. Chemical Analysis of Precipitation for GAW: Laboratory Analytical Methods and Sample Collection Standards. WMO/ TD - No. 550, 27 pp.
- SEQUEIRA, R. 1981. Acid Rain: Some preliminary results from Global Data Analysis. Geophys. Res. Lett. Vol. 8, No. 2, 147-150.
- WHELPDALE, D. M. y GALLOWAY, J. N. 1979. An Atmospheric Sulphur Budget for Eastern North America. In: WMO Symp. on the Long-Range Transport of Pollutants and Its Relation to General Circulation. WMO-No. 538, Geneva, 213-221.
- WMO, 1988. International Operations Handbook for Measurement of Background Atmospheric Pollution. WMO-No. 491, 110 pp.
- WMO, 1989. VAG y las Actividades de Medición de los Valores de la Química de la Precipitación. Hoja Informativa No. 5 Diciembre.
- WMO, 1992. Report of the WMO Meeting of Experts on the Quality Assurance Plan for the Global Atmosphere Watch. Garish-Partenkirchen, Germany, 26-30, March. WMO/TD-No. 513, 54 pp.
- WMO, 1993. Global Atmosphere Watch Guide. WMO/TD-No. 553, 48 pp.

**Los autores de este escrito son investigadores del Instituto de Meteorología del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, Cuba**