
Zonas fuentes de los compuestos gaseosos del nitrógeno que afectan al occidente de Cuba

Characterization of the source regions of Nitrogen Gaseous Compounds that Affect West of Cuba

Lic. Yanssel Gómez Zamora | yanssel.gomez@insmet.cu | Centro Meteorológico Provincial La Habana-Artemisa-Mayabeque

Dr. Cuesta Santos | osvaldo.cuesta@insmet.cu | Centro Contaminación y Química Atmosférica

Lic. Mariam Fonseca Hernández | mariam.fonseca@insmet.cu | Centro Contaminación y Química Atmosférica

Recibido: 28 de enero, 2013; Aceptado: 10 de mayo, 2013. pp. 57 – 67.

Resumen

En el presente trabajo se utilizó el modelo Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT), el cual permite construir las retrotrayectorias de las masas de aire y conocer su evolución, con vistas a determinar las zonas fuentes de los compuestos gaseosos de nitrógeno que afectan la región occidental de Cuba, en específico, la estación regional La Palma, en la actual provincia de Pinar del Río. La investigación tomó como período de estudio 2006-2008; como resultado de su análisis se encontraron seis zonas fuentes para la región, que fueron caracterizadas de acuerdo con su situación geográfica y sus posibles focos contaminantes. Posteriormente, se analizaron los datos de medición de los principales compuestos gaseosos de nitrógeno registrados en la estación La Palma para un período de cinco años (2004 a 2008) y se calcularon las respectivas retrotrayectorias para el nivel de 500 m, con una duración de 5 días y un intervalo de 24 h. Esto permitió conocer la frecuencia de llegada de los contaminantes a la estación La Palma según las zonas mencionadas. A los valores medios de los compuestos gaseosos de nitrógeno se les realizó un análisis estadístico mediante la técnica de análisis de varianza (ANOVA), con miras a conocer si son reales las diferencias que puedan presentar estos valores.

PALABRAS CLAVE: Modelo HYSPLIT, retrotrayectorias, contaminantes atmosféricos, zonas fuentes, ANOVA.

Abstract

In this research we used the Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) model which allows you to build the backwards trajectories of air masses and determine the source regions of pollutants affecting the western Cuba, in specific to the regional station La Palma in the present province of Pinar del Rio. This research took as year study period from 2006 to 2008. As a result of this analysis it was found six source regions for the area, which were characterized according to their geographical location and potential pollutant sources. Then analyzed the measurement data of the main nitrogen gaseous compounds, recorded at the station La Palma for a period of five years (2004 to 2008) and the respective backwards trajectories were calculated for the level of 500 m with duration of 5 days and an interval of 24 h. This allowed determining the frequency of arrival of pollutants to the west of Cuba by the above-mentioned source regions.

The average values of pollutants were performed statistical analysis using ANOVA technique to learn if

they are real differences that may have these values.

Keywords: HYSPLIT model, backwards trajectories, atmospheric pollutants, sources regions, ANOVA (analysis of variance).

Introducción

Los contaminantes atmosféricos causan incontables problemas ambientales que hasta hace poco se pensaba que estaban confinados a Europa y Norteamérica. Hoy día, la contaminación atmosférica regional se considera un problema serio y creciente en muchas partes del mundo, sobre todo en los países en desarrollo.

Los efectos sobre los ecosistemas naturales y seminaturales por la deposición de los compuestos oxidados y reducidos de nitrógeno (N) presentes en la atmósfera se han detectado de diversas formas en Europa (Lorenz *et al.*, 2006), principalmente por el cambio de la composición de las especies, el incremento en la altura de los pastos (con declinación de la biodiversidad), el desbalance nutricional y el cambio en la flora de los suelos. Estos compuestos oxidados y reducidos de nitrógeno tienen la capacidad de afectar la salud humana, diversos ecosistemas terrestres y acuáticos, y el clima (Galloway, 1995; IPCC, 2007).

Desde finales del siglo xx, hasta la actualidad, el Centro de Contaminación y Química Atmosférica ha realizado múltiples trabajos relacionados con la calidad del aire y la contaminación atmosférica en Cuba, con el propósito de conocer la influencia de las variables meteorológicas y climáticas en la dispersión y la transformación de contaminantes, sus fuentes y zonas de procedencia. Como una contribución a los estudios sobre la contaminación atmosférica a nivel regional surge esta investigación, donde se aplica el modelo de trayectorias de masas de aire HYSPLIT a las retrotrayectorias recorridas por los principales compuestos gaseosos del nitrógeno en el período 2004–2008, con el objetivo de determinar cuáles son

específicamente las zonas fuentes de estos compuestos gaseosos de nitrógeno que afectan el occidente cubano en la Estación Regional La Palma, Pinar del Río, Cuba, especializada en el monitoreo de la contaminación atmosférica. Esta estación se encuentra en un ecosistema boscoso tropical en el cual se pueden estar produciendo efectos nocivos a causa de la deposición de estos contaminantes.

Materiales y métodos

Estación de muestreo

Los datos para elaborar el presente trabajo se tomaron de la Estación Regional La Palma (Fig. 1), perteneciente al Sistema Nacional de Vigilancia de la Contaminación Atmosférica (SINVCA) del Centro de Contaminación y Química Atmosférica (CECONT), adscrito al Instituto de Meteorología del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de Cuba (CITMA), 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 gaseosos de nitrógeno a nivel regional. La estación se ubica en la porción más occidental de la Sierra del Rosario, en la cordillera de Guaniguanico, específicamente en el municipio La Palma, provincia de Pinar del Río, en los 22°45'59" de latitud norte y 83°33'41" de longitud oeste, a una altura de 47.39 m sobre el nivel del mar. Es una estación rural de montaña en la que predomina la formación vegetal de pinares, extendidos en el sector este y sur; hacia el sector norte y oeste se encuentran cultivos de caña de azúcar y cultivos menores; está situada, aproximadamente, a 6 km de la costa, donde el terreno va cambiando de llano (en la costa) a ondulado (en las inmediaciones de la estación). En la zona no se encuentran fuentes potentes de emisión de contaminantes.

Como parte inicial de esta investigación se escogió el período 2006–2008 con el propósito de determinar

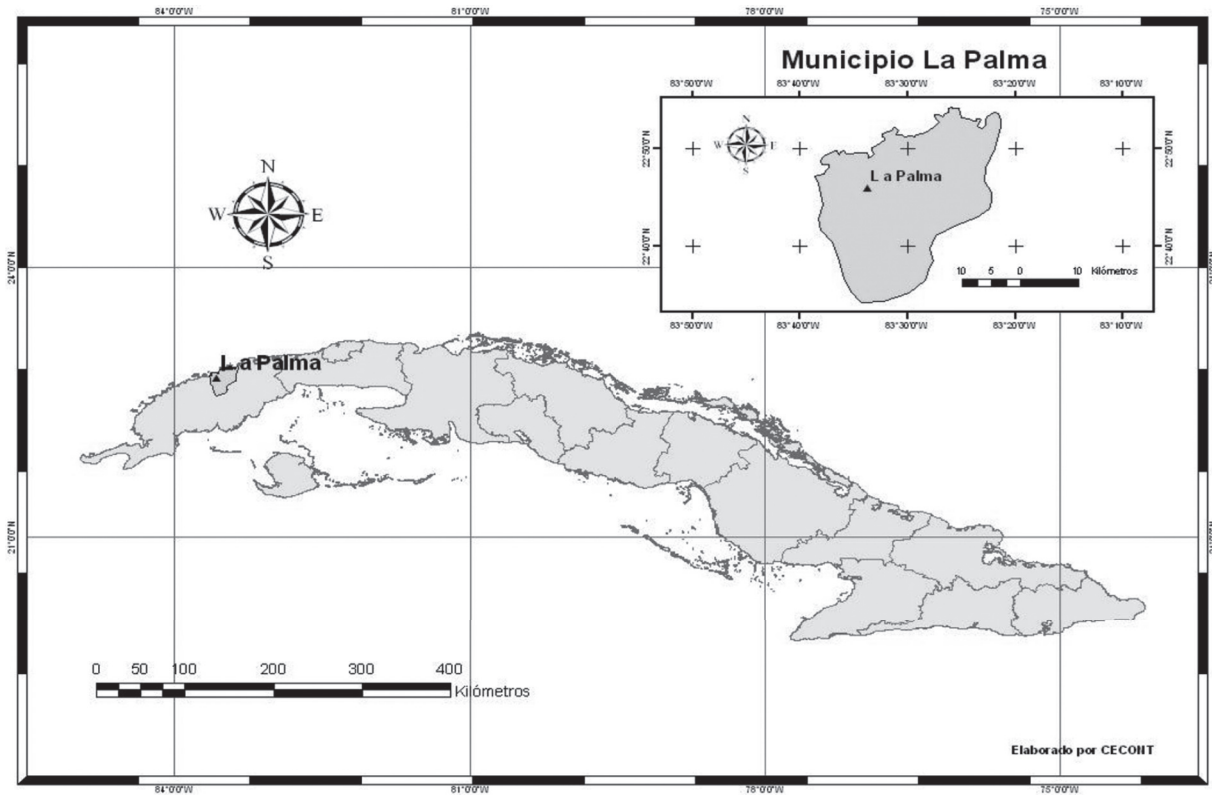


Fig. 1 Estación Regional La Palma.

la retrotrayectoria de las masas de aire, día a día, hasta llegar al occidente cubano, y conocer las zonas por donde transitaban. Mediante el modelo HYSPLIT se calcularon las 1 096 retrotrayectorias correspondientes a ese período para un intervalo de 120 h, representativo del desplazamiento de una masa de aire de origen sinóptico, un subintervalo de 24 h; además, las retrotrayectorias se calcularon para tres niveles con la finalidad de fijar el recorrido de las masas de aire en la capa límite planetaria (PBL) y, a su vez, en la troposfera libre (Fig. 2), creando para cada nivel un mapa que incluye la frecuencia de retrotrayectorias en cada zona encontrada; se calcularon las retrotrayectorias para el nivel de 500 m, que es el interior de la PBL y donde existe un mayor proceso de mezcla de contaminantes dado que a esta altura intervienen los procesos turbulentos de la atmósfera; asimismo, se modeló el nivel de 1 500 m, considerado como el límite superior de la PBL, donde pueden observarse los procesos de intercambio entre esta capa y la alta troposfera; también se

modeló el nivel de 3 000 m en la tropósfera libre, donde no intervienen los efectos de la fricción superficial y, por tanto, puede observarse el movimiento libre de los contaminantes en esta capa.

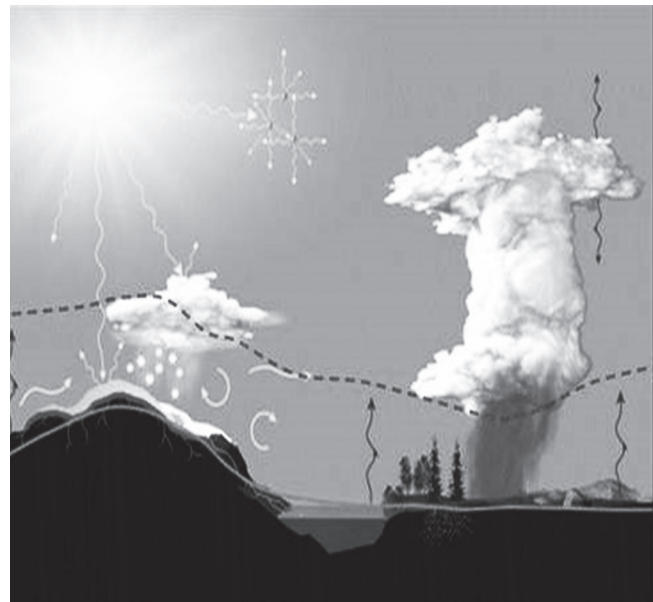


Fig. 2 Capa límite planetaria (PBL).

Teniendo en cuenta que el nivel de 500 m es el más cercano a la superficie y uno de los que más afecta la calidad del aire que respiramos, se calcularon las retrotrayectorias para los días que afectaron los compuestos gaseosos de nitrógeno (NO, NO₂, NO_x) y amoníaco (NH₃) a la estación regional La Palma, con los datos registrados por esta en el período señalado (2004–2008), con vistas a determinar sus zonas fuentes.

Monitoreo

Para la obtención de los compuestos de NO₂ se realizó el procedimiento de los tubos de absorción (Volberg, 1982; Cuesta et al., 1995; WMO, 1986), donde se obtiene el NO₂ del aire mediante una columna de gránulos de vidrio recubiertos por una solución de yoduro de potasio que contiene arsenato de sodio. En el caso del amoníaco se determina por una modificación pequeña de la técnica del indofenol (de Harwood y Kühn); se utiliza un frasco absolvedor relleno con 12 ml a 0.02 % de ácido sulfúrico y antes del burbujeador se coloca un filtro de membrana para la captura de los aerosoles de amonio. Este procedimiento se recomienda por la OMM para el muestreo en lugares remotos y está minuciosamente explicado en el Manual para la operación de la Red de Control de la Contaminación Atmosférica preparado por el Centro de Contaminación y Química Atmosférica (CECONT) del Instituto de Meteorología del Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente (CITMA). Se le aplicó el cálculo de retrotrayectorias a los 431 casos registrados por la Estación Regional en el período 2004–2008.

Modelo HYSPLIT

El modelo *Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory* (HYSPLIT) desarrollado por NOAA's Air

Resources Laboratory (ARL) (Draxler and Hess, 1998) presenta características importantes, entre las cuales puede mencionarse la dispersión de una pluma de emisión discreta (*puff*) y partícula calculada a partir de la varianza en las velocidades, las concentraciones calculadas con partículas en celda o distribuciones Top-Hat/Gaussiana-Meteorología y(o) mallas de concentración simultaneas y múltiples. Su método de cálculo se basa en las aproximaciones euleriana y lagrangiana (Fig. 3).

Bajo la aproximación euleriana, la concentración en cada celda de malla se calcula integrando el flujo de contaminantes correspondiente a cada interfaz de cada celda proveniente de la dispersión y advección de ese contaminante. Cuando se utiliza la metodología lagrangiana, las concentraciones se computan sumando la contribución de cada *puff* de contaminantes que se transporta a través de la malla siguiendo su trayectoria. Un modelo lagrangiano puede simular la dispersión de contaminantes basándose en el crecimiento de *puffs* de contaminantes mediante la utilización de los segundos momentos o modelando explícitamente la evolución de un grupo de partículas.

En la aproximación lagrangiana, el estudio se centra en el comportamiento de partículas o elementos discretos de contaminantes representativos de este. La expresión lagrangiana general se basa en una función de densidad de probabilidad de transición, que representa la probabilidad de que si el elemento de contaminante está en \vec{x}' en un tiempo t' , se desplace hasta \vec{x} en el instante t ($Q(\vec{x}, t | \vec{x}', t')$), teniendo en cuenta, tanto la distribución inicial del contaminante, como el aporte de los focos emisores $S(\vec{x}', t')$ (ecuación 1).

Ecuación 1. Método de cálculo lagrangeano

Contrario a lo que su sigla significa, HYSPLIT puede simular una distribución de contaminantes a partir

$$\bar{c}(\vec{x}, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} Q(\vec{x}, t | \vec{x}_0, t_0) \bar{c}(\vec{x}_0, t_0) d\vec{x}_0 + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} Q(\vec{x}, t | \vec{x}', t') S(\vec{x}', t') d't' d\vec{x}'$$

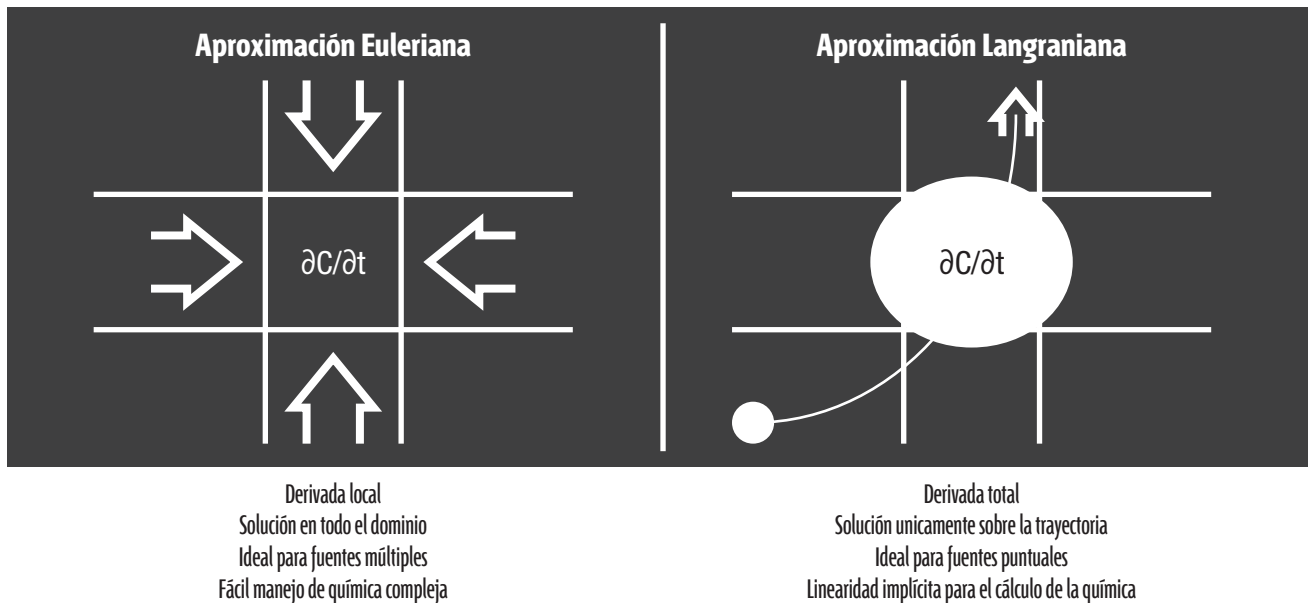


Fig. 3 Métodos de cálculo del modelo HYSPLIT.

de una partícula simple o *puff*, o siguiendo el movimiento dispersivo de un gran número de partículas (Draxler, 2004).

HYSPLIT cuenta con las herramientas capaces de dar seguimiento a los aspectos siguientes:

1. Contaminación procedente de varias fuentes de emisión (tanto móviles, como estacionarias).
2. Emisiones de materiales radioactivos.
3. Incendios forestales.
4. Intrusiones de polvo sahariano.
5. Emisiones de ceniza volcánica.
6. Tormentas de arena y polvo.
7. Partículas de polen.

Tratamiento estadístico para los valores medios de nitrógeno

Para decidir si las diferencias observadas entre más de dos medias pueden atribuirse al azar o si existen diferencias reales entre las medias de las poblaciones de las cuales se obtuvieron las muestras se utilizó el análisis de varianza, una técnica que, cuando se estudian las características de las concentraciones para los compuestos gaseosos del nitrógeno atmosférico

cuyos valores no son los mismos en las seis zonas diferenciadas, permite decidir si tales efectos ocurren al azar o si, realmente, son diferentes.

Dado que en el cálculo de varianzas “entre y dentro” de los grupos existen varios pasos, se acostumbra exponer el grupo completo de resultados en la tabla de análisis de varianza (ANOVA) (Tabla 1), la cual incluye las fuentes de variación, las sumas de los cuadrados (las variaciones), los grados de libertad, las varianzas (los cuadrados medios) y el valor estadístico de prueba F_0 (distribución F de Fisher que se basa en la razón de dos varianzas).

Con el fin de determinar si las medias de los diversos grupos son todas iguales, pueden examinarse dos estimadores diferentes de la varianza de la población: el primero, se basa en la suma dentro de los cuadrados dentro de los grupos (SC_D), mientras que el segundo acude a la suma de los cuadrados entre los grupos (SC_E). Si la hipótesis nula es cierta, estos estimadores deben ser, aproximadamente, iguales; si es falsa, el estimador basado en la suma de los cuadrados entre grupos debe ser mayor.

TABLA 1

Tabla de análisis de varianza (ANOVA)

Fuente de Variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Estadístico
Entre grupos	$\sum_{i=1}^K n_i (\bar{y}_i - \bar{y})^2$	$k-1$	$\frac{SC_E}{k-1}$	$F_0 = \frac{S_E^2}{S_D^2}$
Dentro de los grupos	$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$	$n-k$	$\frac{SC_D}{n-k}$	
Total	$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y})^2$	$n-1$		

ANOVA

Análisis y discusión de los resultados

Determinación y caracterización de las zonas fuentes

Del análisis a las 1 096 retrotrayectorias calculadas en el período 2006–2008 se determinaron las principales zonas fuentes de procedencia de las masas de aire que afectan al occidente de Cuba, en especial a la estación La Palma. Se detectaron seis regiones o áreas fuentes que emiten hacia esa estación las masas de aire con su composición química característica (Fig. 4). El promedio de emisión que condujo a seleccionar estas seis áreas contaminantes mostró cierta similitud en los niveles de 500 m y 1 500 m, tal vez evidenciado por la influencia topográfica de la superficie (Figs. 5 y 6), aunque no se comportó de igual manera para el nivel de 3 000 m, puesto que a esta altura in-

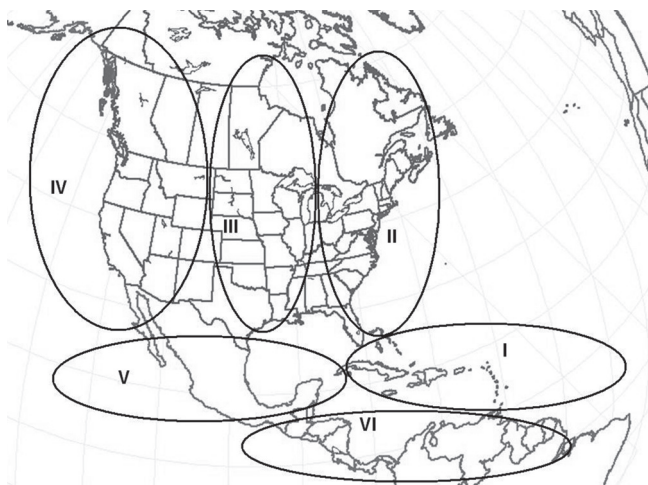
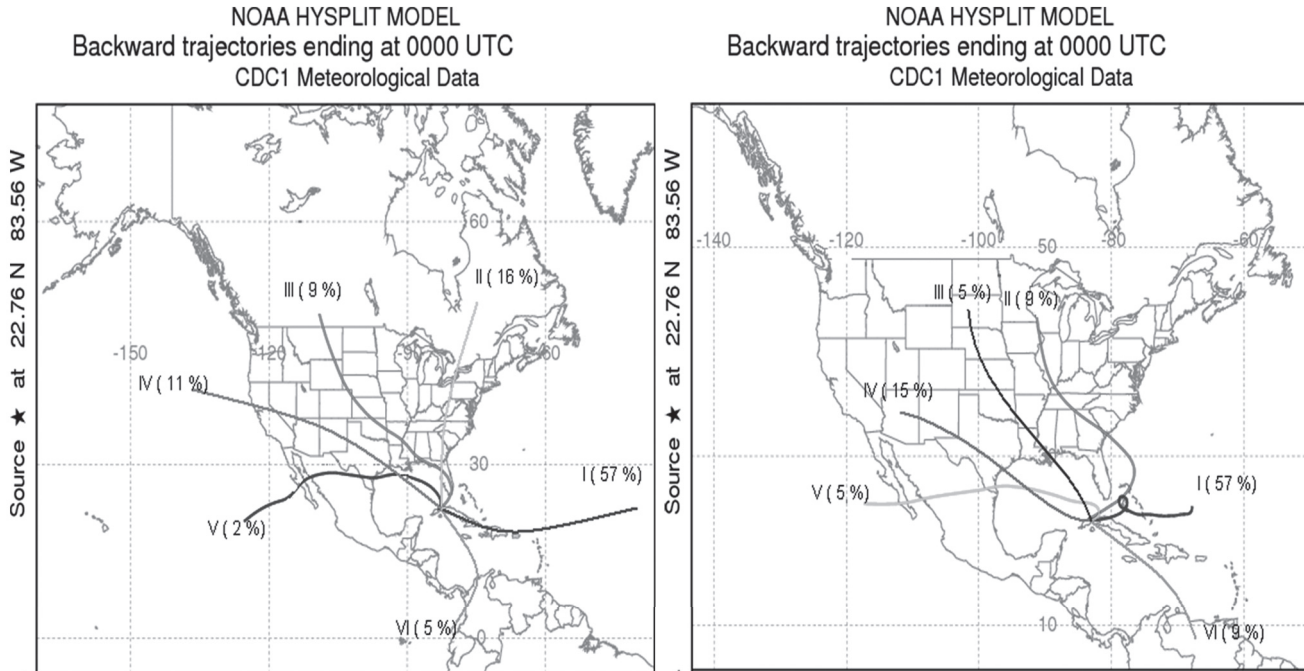


Fig. 4 Mapa regional dividido en las zonas de estudio.

fluyen otros factores y sistemas sinópticos, como es el caso del Anticiclón Mexicano. Estas regiones o áreas fuentes se denominan zonas, y se componen por características físico-químicas que las diferencian.

ZONA I

Se ha definido a la Zona I como la región enmarcada entre los 15° y 25° de latitud norte, desde la costa occidental de África, hasta los 83° de longitud oeste, zona en la cual se ocupa un área importante del Océano Atlántico. Es el área geográfica ubicada al este de la estación, que recorre casi todo el territorio cubano y gran parte del Océano Atlántico. Se escogió como la primera zona por presentar los valores mayores en cuanto a la frecuencia de retrotrayectorias que llegan a la estación, condicionado, fundamentalmente, por el flujo zonal de vientos (los alisios) impuesto en Cuba todo el año. En esta zona, el predominio de fuentes potentes de contaminantes se encuentra reducido dado que los países que se encuentran en esta no cuentan con un desarrollo económico que pueda provocar grandes impactos al medio ambiente, así como tampoco cuentan con grandes extensiones de terrenos que puedan ser dedicados a la agricultura y, por ende, provocar la contaminación generada por este tipo de actividad. Dentro de los territorios más extensos en esta zona se encuentran: Puerto Rico (10 000 km²), República Dominicana (49 000 km²), Haití (28 000 km²), Jamaica (11 000 km²) y Cuba (111 000 km²), que se dedican, en lo fundamental, a la ganadería, el turismo, la extracción



Figs. 5 y 6 Frecuencia de afectación por zonas fuentes para el período 2006-2008 (500 m izquierda y 1 500 m derecha).

de minerales y, en menor medida, a la extracción y refinación del petróleo. La influencia mayor de esta zona sobre el territorio occidental de Cuba puede apreciarse en los mapas de 500 m y 1 500 m, con más de 50 % de las retrotrayectorias (Figs. 5 y 6), en especial porque —como se ha mencionado— es desde donde se impone el flujo del viento la mayor parte del año.

ZONA II

La Zona II se ubica entre los 25° y 60° de latitud norte, y los 60° y 85° de longitud oeste, representada fundamentalmente por los estados norteamericanos (los Estados Unidos y Canadá) de la costa atlántica, así como los estados adyacentes a estos últimos; es una de las regiones más industrializadas del mundo (Fig. 7) y, por tanto, de las que más contamina; cuenta con un poderío de industrias pesadas dedicadas al suministro de energía eléctrica a la siderurgia y la extracción de minerales; posee, además, grandes ciudades densamente pobladas (por ejemplo, New York y Toronto) y

una densa red de autopistas interestatales importantes que supone un gran tráfico vehicular y, por tanto, una contaminación del aire mayor, lo cual cobra gran importancia si se considera que durante la temporada invernal el arrastre del viento desde ese sector se intensifica, inducido por la componente meridional del viento justo antes del paso de la línea frontal. Es, precisamente, durante el invierno cuando ciudades como Québec, Ontario y antes las mencionadas demandan un suministro de energía eléctrica mayor con miras a la calefacción de hogares y centros de trabajo; por tanto, la contaminación del aire se ve afectada de una u otra forma. La afectación mayor desde esta zona proviene del nivel de 500 m, con 16 % de las retrotrayectorias, dado el flujo meridional que se presenta en la temporada invernal (Fig. 8).

ZONA III

La Zona III se ha acotado entre las zonas II y IV. Está comprendida entre los 25° y 70° de latitud norte, y los

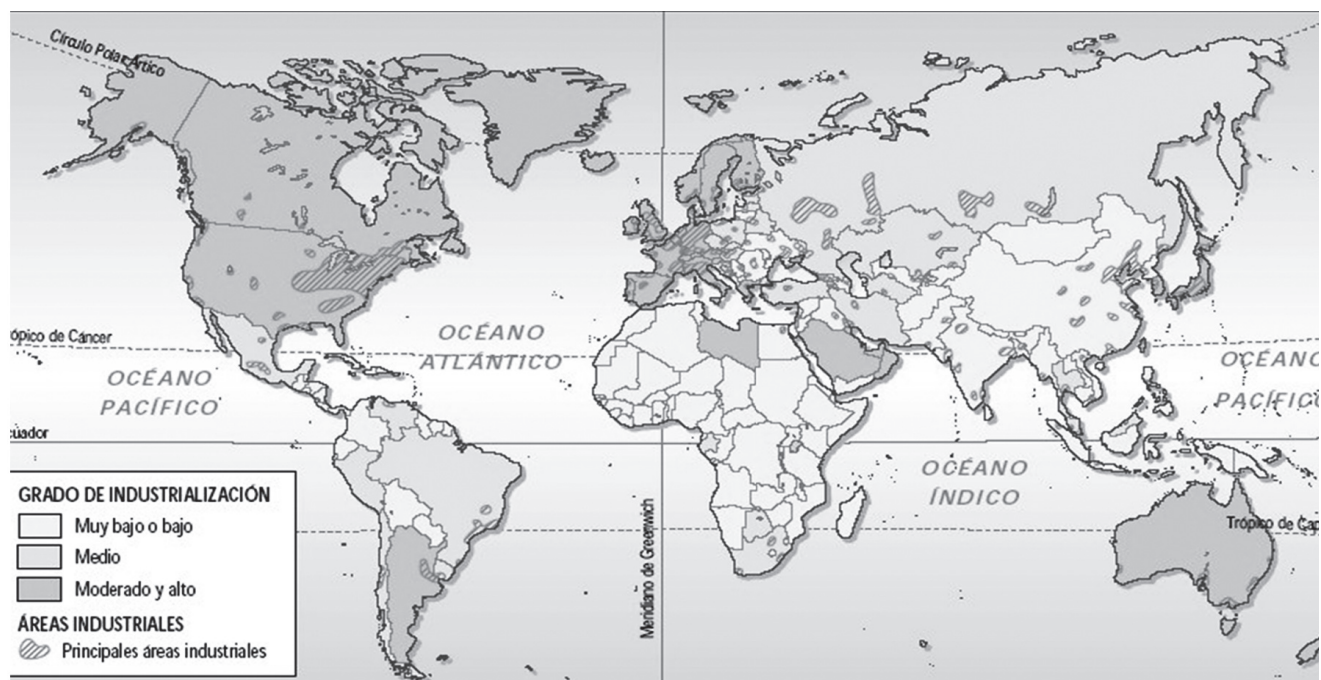


Fig. 7 Mapa mundial de regiones industriales.

85° y los 150° de longitud oeste; ocupada, fundamentalmente, por tierra —entiéndase como la zona central del continente norteamericano—; la región se destina sobre todo a las labores agrícolas, principalmente, en los Estados Unidos, que se consideran entre los mayores productores de maíz y soya del mundo. Esta región también se contempla entre las más ricas en cuanto a contenido de acero y carbón, por lo cual se convierte en una zona siderúrgica de primer orden, aspecto esencial con miras a la fabricación de automóviles; asimismo, la zona cuenta con ciudades importantes y populosas, tales como Chicago (considerada la tercera más poblada de los Estados Unidos) y Winnipeg (Canadá), que al tener una densidad de población alta, por ende, también poseen un alto tráfico vehicular. La mayor contaminación de esta zona se presenta en el nivel de 500 m, con 9 % de las retrotrayectorias (Fig. 8).

ZONA IV

La Zona IV se encuentra entre los 30° y los 80° de latitud norte, y los 105° y 160° de longitud oeste; ocupada por los territorios de la costa pacífica y sus estados adyacentes; al igual que la Zona I, gran parte está

ocupada por el océano (en este caso, el Pacífico). En esta zona, la contaminación es emitida por los importantes pozos petroleros y las áreas refinadoras de Texas, Kansas y California (este estado cuenta con la segunda ciudad más poblada del país), Los Ángeles; Canadá también cuenta con una zona de alta producción de energía eléctrica en la ciudad de Vancouver, en la Columbia británica. La mayor contribución de esta zona proviene del nivel de 3 000 m, con 19 % de afectación (Fig. 9), tal vez en respuesta a que la intensidad de la circulación de los vientos del oeste en latitudes medias aumenta con la altura, característica esta que se ve más acentuada en el invierno que en el verano; o sea, para 3 000 m predominan amplios patrones de ondas que pueden ser observados en los mapas de aire superior de la meteorología sinóptica.

ZONA V

La Zona V está comprendida entre los 20° y los 30° de latitud norte, y los 83° y 130° de longitud oeste; es el área geográfica ubicada al oeste de la estación, que, cruzando el estrecho de Yucatán, abarca la mayoría de los municipios de la actual provincia de Pinar del Río; tam-

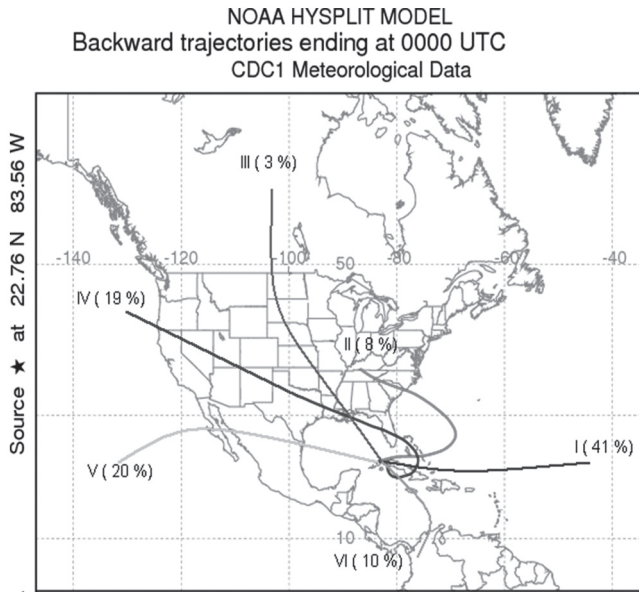


Fig. 8 Frecuencia de afectación por zonas fuentes para el período 2006-2008 (3 000 m).

bién ocupa en toda su extensión al Golfo de México y al propio país, además de abarcar gran parte del Océano Pacífico. Aunque la presencia de un flujo regular desde esta zona no sea mucha en gran parte del año, al realizar las corridas del modelo se presenta un porcentaje elevado de retrotrayectorias que llegan desde esta en el período analizado, fundamentalmente, en niveles altos. En esta zona se encuentra los territorios de México, Nicaragua y Honduras, cuya fuente de contaminación es la extracción y la refinación del petróleo, así como la extracción de minerales, fundamentalmente en las regiones cercanas a la costa y en aguas de los golfos de México y Campeche, los cuales, en ambos procesos, son enviados a la atmósfera y provocan el arribo a territorio cubano de estos compuestos contaminantes derivados del nitrógeno. La afectación mayor de esta zona llega desde el nivel de 3 000 m, con 20 %. Como se puede observar en la figura 9, existe un predominio de flujo zonal de los oestes porque, para esa altura (700 hPa), se tiene una mayor representación el Anticiclón Mexicano.

ZONA VI

La Zona VI está ubicada entre los 7° y 20° de latitud norte, y los 50° y 85° de longitud oeste, al sur del te-

rritorio cubano, y ocupa parte del Mar Caribe y los territorios de Panamá, Colombia y Venezuela; cuenta con industrias importantes encaminadas a la extracción del carbón y el cemento, así como ostenta gran desarrollo en las industrias química y del petróleo, con grandes complejos industriales capaces de generar una contaminación a gran escala que pueda afectar con la presencia de un flujo sur. De igual forma, estos países tienen la agricultura como renglón económico, donde la contaminación mediante este tipo de técnicas podría llegar por la aplicación de fertilizantes a gran escala. De igual manera que en las zonas IV y V, la mayor frecuencia de retrotrayectorias proviene del nivel de 3 000 m (Fig. 8) por los sures que invaden territorio cubano en marzo y abril.

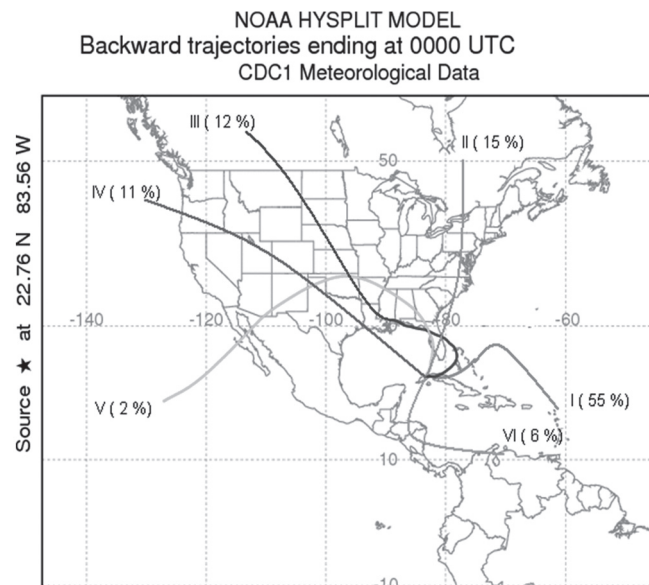


Fig. 9 Porcentaje de afectación por zonas fuentes (500 m).

Cálculo y análisis de las retrotrayectorias para el nivel de 500 m de los compuestos gaseosos de nitrógeno y amoníaco, según los datos reportados por la estación en el período 2004-2008

Se ejecutaron 431 retrotrayectorias en las que se analizó la concentración de los compuestos de óxidos de nitrógeno, según sus zonas fuentes para el nivel de

500m, para determinar cuáles son las que más contribuyen a la contaminación del aire; se observó un fuerte impacto desde las zonas I, V y VI (Fig. 9), donde se sobrepasó el valor de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tabla 2) para el NO_x ; la afectación por amoníaco excedió el nivel de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, excepto en la Zona III, la cual muestra valores de NO altos. Es importante resaltar que para las zonas V y VI el promedio de las concentraciones de los compuestos de óxidos de nitrógeno está por encima de $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que el amoníaco se mantiene por encima de $1,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

La tabla 2 muestra el número de muestras y los valores medios de las concentraciones de los principales compuestos gaseosos de nitrógeno y amoníaco para las seis zonas fuentes encontradas.

TABLA 2

Valores medios (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) de los principales compuestos gaseosos de nitrógeno y amoníaco para 500 m en el período 2004-2008

Zonas	No. muestras	NO	NO_2	NO_x	NH_3
I	236	2.7	2.9	5.6	1.1
II	64	2.4	2.5	4.9	1.8
III	51	2.7	2.2	4.9	0.7
IV	48	2.4	2.4	4.8	1.1
V	7	4.1	3.8	7.9	1.3
VI	25	5.2	4.3	9.5	1.2

Posteriormente, se acometió el análisis de varianza, que permitió decidir si las diferencias observadas entre las medias de las zonas pueden atribuirse al azar o si existen diferencias reales. Como resultado, se encontraron diferencias reales en los valores del NO_x para las zonas II, III, IV, V y VI, y para el caso del NO, en las zonas V y VI. Vale destacar que para las zonas V y VI, la refinación de petróleo es una de las actividades que más contribuye a la contaminación atmosférica, la cual puede tener influencias en el occidente del país dada la presencia de un flujo del oeste y la incidencia de los sures.

Conclusiones

La adecuada utilización del modelo HYSPLIT permitió conocer el origen y la trayectoria de los compuestos gaseosos de nitrógeno que han contribuido a la contaminación de la zona occidental de Cuba. Además, posibilitó seleccionar seis zonas fuentes, diferenciando tres de estas que transportan estos compuestos desde el continente norteamericano.

Se han analizado los valores medios de las concentraciones de los principales compuestos gaseosos de nitrógeno mediante técnicas estadísticas para identificar las zonas que más podrían influir en afectaciones a la calidad del aire en el occidente de Cuba, en especial, a la estación La Palma. Se destacan las zonas fuentes V y VI por presentar valores más altos para el contaminante óxido de nitrógeno (NO_x).

Como resultado general se tiene que aunque a nivel mundial se han desarrollado investigaciones relacionadas con esta temática, es válido señalar que, en este caso, es la primera vez que se realiza un trabajo de este tipo en el Centro de Contaminación y Química Atmosférica del Instituto de Meteorología, enfocado, fundamentalmente, en los cálculos de las retrotrayectorias y la identificación de las zonas fuentes de las concentraciones de los principales compuestos gaseosos de nitrógeno que afectan el territorio estudiado.

Recomendaciones

Ampliar la serie temporal de cálculo de retrotrayectorias para continuar el estudio de las zonas fuentes con la aplicación de herramientas estadísticas con miras a mejorar su identificación geográfica.

Continuar los estudios y el monitoreo sistemático sobre la procedencia y el origen de las masas de aire que influyen en las características de la composición química-física de la atmósfera por las repercusiones ecológicas que tienen sobre los ecosistemas naturales y construidos.

Referencias

- 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, Universidad de la Habana, La Habana.
- Draxler, R 2004, 'Seminario de capacitación para el uso del modelo HYSPLIT en PC. Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model', *National Oceanic and Atmospheric Administration*, NOAA, USA.
- Draxler, R & Hess, G 1998, 'Description of the HYSPLIT 4 Modeling System', *Technical report*, Air Resources Laboratory.
- Galloway, J. N, Likens, G. E, Keene, W. C & Miller, J. M 1995, 'The composition of precipitation in remote areas the world', *J. Geophys. Res.* Vol. 87, no.11, pp.: 71-87.
- Solomon, S, Qin, D, Manning, M 2007, 'Summary for Policymakers: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change', in *Climate Change 2007, The Physical Science Basis*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, p. 18.
- Lorenz, M, Fischer, R, Becher, G, Mues, V, Siedling, W, Kraft, P & Nagel, D 2006, 'Forest Condition in Europe', *Technical Report*, UNECE, Geneva.
- Volberg, Bh 1982, 'Instrucciones metodológicas provisionales para el análisis químico del aire atmosférico por los tubos de absorción', *Comité Estatal de Hidrometeorología*, Leningrado, URSS p. 34.
- WMO 1986, 'Environmental pollution monitoring research programme'. *WMO-técnical document*, Geneva vol. 45, no. 151.