

Aplicación del Modelo HYSPLIT en estudios de contaminación atmosférica en la estación regional La Palma. Estudios de Caso

Yanssel Gómez Zamora, Osvaldo Cuesta Santos

Instituto Superior de Ciencias y Tecnologías Aplicadas Facultad de Gestión de la Ciencia la Tecnología y el Medio Ambiente. Centro de Contaminación y Química de la Atmósfera, Instituto de Meteorología
yansel@instec.cu

Resumen

En este trabajo se aplicó el modelo HYSPLIT para identificar las trayectorias inversas de masas de aire, utilizando la información meteorológica y la composición química de las muestras individuales de lluvia provenientes de la Estación Regional de Monitoreo de la Contaminación Atmosférica La Palma, la cual se localiza dentro de un ecosistema tropical boscoso en la provincia de Pinar del Río. Como parte de este análisis se estudiaron los tipos de situaciones sinópticas asociados a las trayectorias de masas de aires donde se registraron los valores de pH significativamente más bajos o lluvia ácida. Para ello se analizaron tres casos de estudio a partir de diferentes zonas de origen.

Palabras clave: modelo HYSPLIT, trayectorias inversas, lluvias ácidas

Introducción

Muchas actividades industriales que involucran a combustibles fósiles son altamente contaminantes y afectan de manera directa la calidad del aire y, consecuentemente, la salud humana. Conocer en qué magnitud se afecta la calidad del aire que depende de factores propios de la fuente contaminante, y la localización de los receptores es importante a la hora de trazar las estrategias de desarrollo, para lo cual es imprescindible el uso de modelos de calidad del aire.

Los modelos de difusión atmosférica son una de las soluciones más extendidas en el análisis del comportamiento de los contaminantes en la atmósfera. Su planteamiento general consiste en aplicar un modelo matemático para describir las variaciones que experimentan los contaminantes en la atmósfera, y sumar las contribuciones de todos ellos en una ecuación de balance, basados en la entrada de datos meteorológicos, topografía, uso del terreno e información de la fuente emisora; además, estos modelos caracterizan los contaminantes primarios que son emitidos directamente en la atmósfera y, en algunos casos, los contaminantes secundarios resultados de reacciones químicas que tienen lugar en la atmósfera.

Un modelo de difusión atmosférica resultaría, en rigor, una aplicación específica de un modelo de flujo atmosférico no estacionario al que se le añaden las ecuaciones de balance para cada componente. Es decir, la modelación del transporte de los contaminantes mediante un modelo de difusión atmosférica requiere además, el conocimiento del comportamiento del flujo atmosférico.

La forma en que se resuelva la ecuación de difusión puede ser bastante diferente, y clásicamente se han planteado dos soluciones genéricas: la vía euleriana y la vía lagrangiana; y muchas soluciones particulares. Los modelos eulerianos utilizan un sistema de referencia absoluto, habitualmente en el foco emisor. Los modelos lagrangianos, distinguen dos sistemas de coordenadas: uno fijo (en el foco emisor) para el movimiento general de los contaminantes (advección) y otro móvil que se desplaza con el penacho, para la descripción de la difusión turbulenta en su interior.

En cuanto a los modelos lagrangianos, las emisiones, reacciones, deposición y mezcla de los contaminantes se analizan para un volumen de aire que va cambiando su posición de acuerdo con la velocidad y dirección del viento –y no para una región entera como en los eule-

rianos. Los modelos lagrangianos se clasifican como modelos de trayectoria y modelos de "puffs" de acuerdo con la geometría del sistema de modelación. Estos últimos simulan una pluma de emisión, continua o discreta como paquetes comúnmente llamados "puffs", y generalmente utilizan una solución gaussiana no estacionaria (Draxler, R. R., 2004).

En los modelos de trayectoria se define una columna hipotética de aire que se desplaza bajo la influencia de los vientos dominantes y se asume que no hay intercambio de masa entre la columna y sus alrededores, excepto por las emisiones que ingresan a la columna por la base durante su recorrido (Seinfeld y Pandis, 1998). La columna se mueve continuamente de manera que el modelo estima la concentración de los contaminantes en diferentes lugares y momentos a partir de las concentraciones iniciales, las emisiones y las transformaciones químicas. Su aplicación es recomendable en evaluaciones de calidad del aire que consideren el transporte a grandes distancias para modelar el comportamiento de masas individuales de aire e incluso, para evaluar la calidad del aire en casos en los que existan limitaciones de información para caracterizar las emisiones y la meteorología de una región completa. Entre los modelos de trayectoria más utilizados están el *Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model (HYSPPLIT)*, (Draxler and Rolph, 2010), el cual se utiliza en el desarrollo del presente trabajo.

Este modelo se utiliza para conocer la trayectoria recorrida por las masas de aire de un conjunto de muestras individuales de precipitaciones que han provocado lluvias ácidas en la Estación Regional de Monitoreo de la Contaminación Atmosférica La Palma, situada en un ecosistema boscoso en la provincia de Pinar del Río. Como parte de este análisis se estudian los tipos de situaciones sinópticas asociados a las masas de aires que provocaron pH con valores muy bajos. Se explican tres casos con diferentes orígenes.

Materiales y métodos

Para realizar el trabajo se tomaron los datos de la Estación Regional La Palma de la Red de Control de la Contaminación Atmosférica del Centro de Contaminación y Química Atmosférica (CECONT) del Instituto de Meteorología del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de Cuba, la cual se guía, fundamentalmente, por las metodologías recomendadas por la Organización Meteorológica Mundial para el muestreo y análisis químico de estos compuestos a nivel regional.

La estación se encuentra situada en los 22 45' de latitud norte y los 83 32' de longitud oeste y a una altura de 51 metros sobre el nivel medio del mar (nmm) y a unos 6 Km de la costa norte (figura 1). En los alrededores de la estación no existen fuentes antropogénicas importantes de contaminantes (Cuesta *et al.*, 2006) y la misma está rodeada de bosques de pinos en su porción sur y oeste, mientras que por el norte y el este existen tierras cultivadas de caña, granos, pastos y cultivos menores (Cuesta *et al.*, 2000).

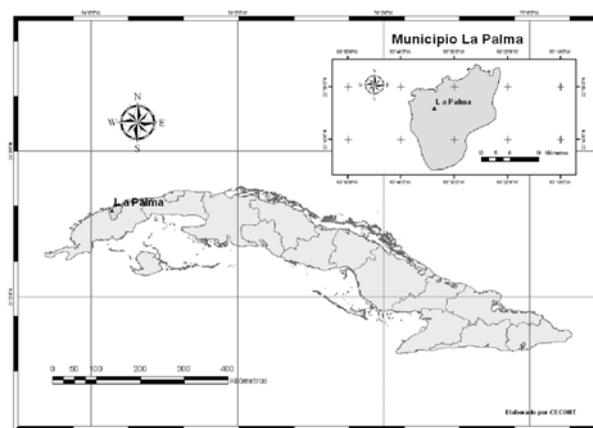


Fig. 1. Ubicación de la Estación La Palma.

Tipos de situaciones sinópticas

Los tipos de situaciones sinópticas (TSS), según la clasificación utilizada por Lapinel (1988), se realizaron por especialistas del Centro del Clima, del Centro de Física de la Atmósfera y del Centro de Contaminación y Química Atmosférica del Instituto de Meteorología.

Además, se consultaron los mapas y estados generales del tiempo del Centro de Pronóstico del Instituto de Meteorología para identificar los sistemas sinópticos estudiados. A continuación se clasifican los tipos de situaciones sinópticas (Cuesta, O. 1995) para una mejor comprensión de los resultados.

TSS-I. Referido a la cercana influencia del anticiclón del Atlántico o de las Azores-Bermudas, el cual constituye el principal centro de acción en nuestra área y es sin duda el sistema sinóptico que con mayor frecuencia influye sobre Cuba. Se considera este tipo cuando el anticiclón penetra en forma de cuña sobre toda Cuba, llegando a cubrir el Golfo de México y el SE de los Estados Unidos. El viento predominante asociado a este sistema puede ser del primero o segundo cuadrante, lo que da origen a los subtipos Ia y Ib.

TSS-II. Se corresponde con aquellas configuraciones del campo bórico que tienen lugar cuando la región central del anticiclón del Atlántico se aleja sensiblemente de nuestras áreas, permitiendo una modificación mayor de sus características iniciales, producto de una más prolongada interacción océano-atmósfera (flujo extendido). Se consideran dos subtipos: Ia flujo extendido no perturbado y el Ib que corresponde a la influencia del sector de divergencia de ondas u hondonadas.

TSS-III. Esta situación se relaciona con aquellas configuraciones del campo bórico que expresan una débil influencia anticiclónica o a la existencia de hondonadas, vaguadas o sistemas de bajas presiones en regiones adyacentes a nuestras áreas cercanas, por lo que las isobaras se muestran de una manera espaciada, predominando un débil gradiente barométrico.

TSS-IV. Se relaciona con el desplazamiento cercano o sobre nuestro territorio de situaciones ciclónicas como depresiones, perturbaciones o huracanes.

TSS-V. Incluye todas aquellas perturbaciones o disturbios que en diferentes formas se manifiestan sobre nuestro territorio. Existen dos subtipos: el Va que comprende ondas y hondonadas que se generan y propagan en el flujo del este y el Vb que se considera exten-

siones meridionales de vaguadas de latitudes medias, líneas de cizalladuras entre dos altas y bajas frías.

TSS-VI. Se incluyen en este tipo las bajas extratropicales que por regla se originan en zonas troposféricas de intensa baroclinidad (frentes ártico y polar), resultantes de ondas de grandes dimensiones; ocasionalmente se originan en el Golfo de México o en regiones muy cercanas a Cuba. Existen cuatro subtipos según la forma de influencia sobre el territorio.

TSS-VII. Se relaciona con los frentes fríos. A los efectos de la clasificación y en consideración a la estructura de los frentes, se consideran cuatro subtipos: el frente clásico (VIIa), el frente revesino (VIIb), el frente casi estacionario (VIIc) y el frente disipándose (VIIId).

TSS-VIII. Se asocia al anticiclón continental polar de poco espesor, considerándose su profundidad en el orden 1,5 a 3 Km, aunque en ocasiones puede ser superior. Se consideran tres subtipos: cuando el centro del anticiclón continental se encuentra en la parte central del continente (VIIIa), el centro del anticiclón se encuentra al sur de los Estados Unidos y el Golfo de México (VIIIb) y cuando el anticiclón se encuentra sobre el Océano Atlántico al este de los Estados Unidos (VIIIc).

Una vez obtenida la clasificación de los tipos de situaciones sinópticas para cada día, estas se asocian con las concentraciones obtenidas para cada uno de los contaminantes estudiados y se analiza su comportamiento conociendo las características de cada TSS y la de los elementos químicos analizados.

Monitoreo de las muestras individuales de lluvia

Para las lluvias se utilizaron los dispositivos recolectores según el procedimiento recomendado por la O.M.M., para las estaciones que cumplen el programa mínimo de las estaciones regionales de contaminación (Cuesta, 1995). Las muestras de lluvias se determinaron por las técnicas recomendadas por la Red BAPMoN de la O.M.M. (W.M.O., 2004; Rodríguez, 1991; MORCCA, 2003).

El tipo de muestra individual se asocia con un determinado tipo de evento de precipitación, por ejemplo los relacionados con la lluvia producida por un frente frío o una tormenta local de origen convectivo. La metodología de su recolección está detallada en los manuales del Centro de Contaminación y Química Atmosférica del INSMET. El pH en la lluvia se determina instrumentalmente, empleando un pH-metro con electrodo combinado. La sensibilidad es 0.05 unidades de pH y la precisión del 1%.

Modelo de difusión atmosférica (Lagrangiano)

En la aproximación *lagrangiana*, el estudio se centra en el comportamiento de partículas o elementos discretos de contaminante 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, $S(\vec{x}', t')$.

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

A partir de las soluciones euleriana y lagrangiana, de la ecuación de difusión, se obtiene la solución gaussiana que representa la solución analítica más ampliamente utilizada al problema de la distribución de contaminantes en la atmósfera. La consideración básica de los modelos gaussianos es que los perfiles de concentración vertical y horizontal en el penacho emitido, siguen distribuciones gaussianas independientes en torno al eje de simetría definido por la dirección del viento, cada una caracterizada por su propia desviación estándar o parámetro sigma.

En la práctica, la transformación de los contaminantes se estima por simplicidad, mediante un factor de decaimiento

que se aplica al resultado final de la ecuación gaussiana. Los modelos gaussianos se clasifican a su vez en estacionarios ($\delta c / \delta t = 0$) y no estacionarios (INE, 2005).

Características del modelo modelo "Híbrido Lagrangiano de Trayectoria Integrada de Partícula Única", del inglés *HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory* (HYSPLIT)

Es un modelo que se utiliza para simular el transporte de masas de aire. Fue elaborado por el Laboratorio de Recursos Atmosféricos (*Air Resources Laboratory-ARL*) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (*National Atmospheric and Oceanic Administration-NOAA*) de Estados Unidos.

Bajo la aproximación euleriana, la concentración en cada celda de la malla se calcula integrando el flujo de contaminantes correspondiente a cada interfaz de cada celda proveniente de la dispersión y advección de dicho contaminante. Cuando se utiliza la metodología lagrangiana, las concentraciones se calculan 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 modelizando explícitamente la evolución de un grupo de partículas. Contrariamente a lo que su sigla HYSPLIT significa, puede simular una distribución de contaminantes a partir de una partícula simple o "puff", o siguiendo el movimiento dispersivo de un gran número de partículas (Draxler R. R., 2004).

La trayectoria integrada supone que una partícula se deja llevar por el viento pasivamente, entonces su trayectoria estará representada por la integral en tiempo y espacio del vector de posición. Se puede utilizar HYSPLIT para estimar la trayectoria progresiva o regresiva de una masa de aire, algo muy útil para interpretar un evento que afecta la calidad del aire.

El análisis de trayectorias regresivas o inversas ayuda a determinar los orígenes y fuentes de los contaminantes, mientras que el análisis de trayectorias progresivas ayuda a determinar la dispersión de los contaminantes, utilizando variables meteorológicas en tiempo real (altura del terreno, temperatura ambiente, lluvia, humedad relativa y radiación solar). Todas estas variables se archivan en una base de datos, que posteriormente van a servir para si se quiere realizar alguna corrida del modelo en un tiempo futuro (Rolph, 2010).

Discusión de los resultados

Se considera que para un mejor estudio de las características de los gases y aerosoles e inclusive de las precipitaciones asociadas a las diversas masas de aire, debemos regirnos por los mecanismos elementales de circulación que constituyen un único mecanismo integrado que actúa en la atmósfera del hemisferio norte y que se caracteriza por mantener la dirección de los principales transportes de masas de aire en el transcurso de 2 a 10 días y específicamente por la clasificación de los Tipos de Situaciones Sinópticas (TSS) propuestos para nuestro país (Lapinel, 1988).

Siguiendo este criterio se decidió estudiar el posible origen de las características ácidas de las precipitacio-

nes en la estación La Palma asociadas con los TSS y la trayectoria inversa recorrida por estas de forma que se puedan explicar estos valores con las características de la masa de aire en que se encuentran.

Los valores del pH en las lluvias individuales y los TSS asociados a sus trayectorias inversas se reflejan en la tabla 1. Se estudiaron un total de 11 muestras de precipitaciones individuales que por sus características físico-química se clasificaron como ácidas. Los valores oscilaron entre 4.0 y 4.72, lo cual permite clasificarlos como de acidez alta (menor de 4,7) y de acidez moderada entre (4.71-5.0), según (López, R. *et al.*; 2008). Los casos de acidez débil (5.1-5.30) no se estudiaron en el trabajo.

Casos de estudio seleccionados

Para tres casos seleccionados se estudiaron las trayectorias inversas, las cuales permiten identificar la procedencia y formación de estas lluvias con el fin de explicar su posible composición y características. El primer caso seleccionado corresponde a la lluvia provocada por un frente frío correspondiente al día 6 de febrero de 1998; el segundo a una precipitación procedente de un flujo del sur (25 de mayo de 2001) y en el tercer caso se analizó una precipitación proveniente de un flujo del este (20 de julio de 1998) debido al flujo de arrastre del anticiclón del atlántico.

Tabla 1. Valores y situaciones analizadas. Valores de precipitación, pH y Tipo de Situación Sinóptica (1998-2001)

Día	Mes	Año	Prec.(mm)	pH	TSS	Procedencia
3	2	1998	21.6	4.72	Vientos de región sur, baja presión al norte del Golfo de México	Continente Norteamericano
6*	2	1998	10.6	4.72	Frente frío sobre el occidente de Cuba	Continente Norteamericano
19	7	1998	38.5	4.60	Flujo del este producto de estar en la periferia del anticiclón del Atlántico	Anticiclón del Atlántico
20*	7	1998	51	4.60	Flujo del este producto de estar en la periferia del anticiclón del Atlántico	Anticiclón del Atlántico
23	12	2000	80	4.70	Frente frío sobre el centro de Cuba	Continente Norteamericano
24	12	2000	31	4.70	Frente frío sobre el centro de Cuba	Continente Norteamericano
24	5	2001	22.4	4.00	Vientos de región sur, influencia de las altas presiones	Anticiclón del Atlántico
25*	5	2001	17.6	4.00	Vientos de región sur, influencia de las altas presiones	Anticiclón del Atlántico
12	8	2001	25.8	4.00	Flujo del este producto de estar en la periferia del anticiclón del Atlántico	Anticiclón del Atlántico
23	8	2001	15	4.30	Flujo del este producto de estar en la periferia del anticiclón del Atlántico	Anticiclón del Atlántico
30	8	2001	47	4.70	Flujo del este producto de estar en la periferia del anticiclón del Atlántico	Anticiclón del Atlántico
1	9	2001	40	4.70	Flujo del este producto de estar en la periferia del anticiclón del Atlántico	Anticiclón del Atlántico

En el primer caso, los valores de precipitación medidos en la estación La Palma fueron 10.6 mm con un pH = 4.72 provocados, fundamentalmente, por el paso de un sistema frontal sobre el occidente del país; este pH clasifica a esta lluvia de acidez moderada.

En la figura 2 se aprecia la corrida del modelo HYSPLIT representando una trayectoria regresiva para alturas de 500, 1000 y 1500 metros para las últimas 72 horas. El origen de la masa de aire proviene del centro oeste de los Estados Unidos, de una zona agrícola, aunque en el litoral del Golfo de México se asientan importantes ciudades que pueden contribuir con la acidificación de la masa de aire con compuestos de nitrato, típicos de la zona agrícola, pero también propios de las zonas urbanas con alto tráfico vehicular, más el posible aporte del azufre de origen industrial. La masa de aire en esta zona baja en altura está por debajo de los 1500 metros; por lo tanto, el arrastre de contaminantes ya está en la típica capa de mezclamiento donde se acumulan los contaminantes provenientes de las capas bajas de la troposfera.

El mapa representa la entrada de un frente frío en el occidente de Cuba, correspondiendo la masa de aire con la clasificación de Lapinel, 1988 de TSS VIIa frente frío clásico, el cual provoca un arrastre de aire frío y seco desde el centro del continente americano.

El segundo caso estudiado corresponde al 25 de mayo de 2001 cuando ocurrió una precipitación en la estación La Palma de 17.6 mm con pH = 4.0, la cual se clasifica como de acidez alta, originada por un flujo sur inducido por la presencia del anticiclón del atlántico. En el modelo de trayectoria (figura 3) se aprecia que el flujo de aire toma poca altura correspondiéndose con una masa de aire estable, pero que con el calentamiento en las aguas cercanas a Cuba gana en altura. El origen ácido de esta lluvia podría estar en correspondencia con las características de los suelos de esta localidad que presenta suelos ácidos de pH 5.1 y de las cercanías (Cuesta, 1995). Aunque el recorrido por la zona sur de Pinar del Río, donde están presente fuentes locales, pudo aportar elementos contaminantes que contribuyeron a la presencia de este valor.

El mapa representa la presencia de un flujo sur de arrastre desde el anticiclón del Atlántico. Está presente el TSS III con débil gradiente de presión, asociado a una hondonada.

El tercer caso estudiado corresponde al día 20 de julio de 1998 cuando ocurrió una precipitación provocada por una lluvia convectiva en la estación La Palma, bajo la presencia de un flujo fuerte del este causado por la posición del anticiclón Azores-Bermudas, provocando la caída de 51 mm con un pH de 4.6, lo cual también clasi-

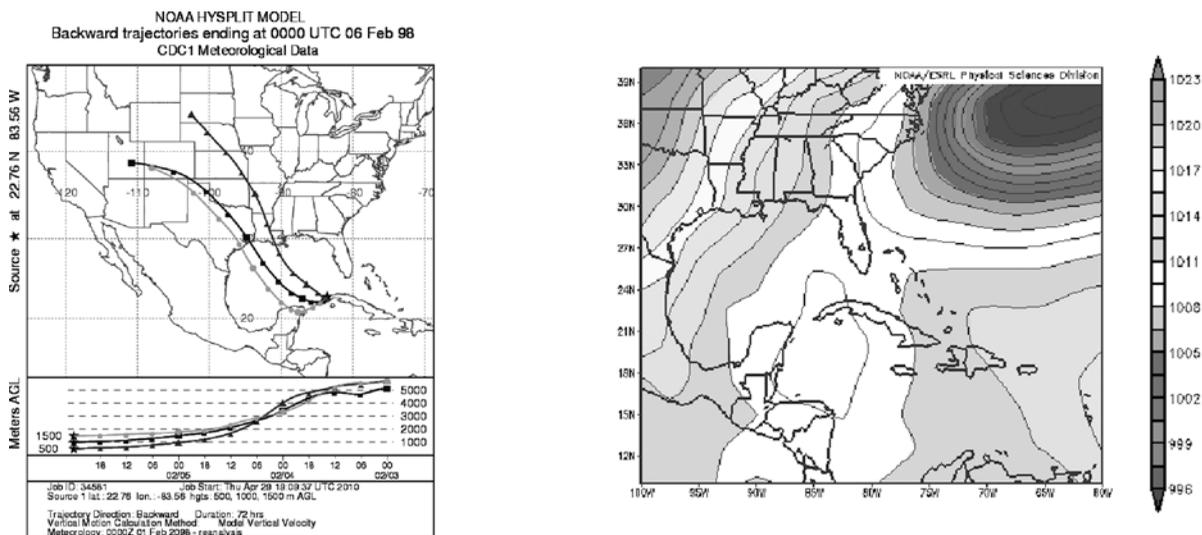


Fig. 2. Frente Frío (6 de febrero 1998). En la izquierda la corrida del modelo y a la derecha la representación del mapa sinóptico de superficie.

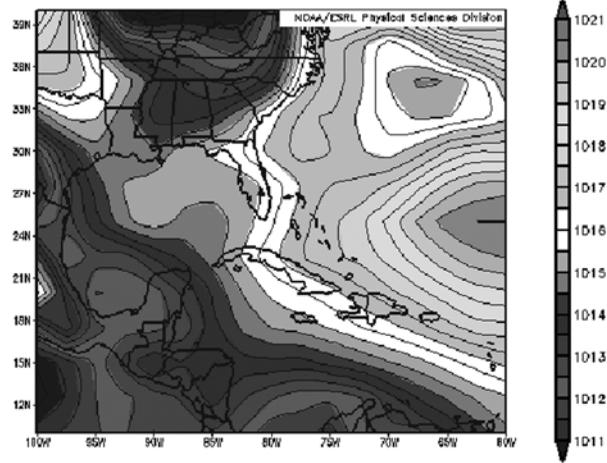
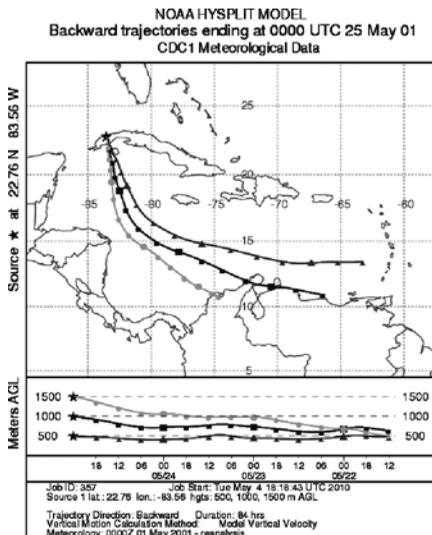


Fig. 3. Flujo del sur (25 de mayo de 2001). En la izquierda la corrida del modelo y a la derecha la representación del mapa sinóptico de superficie.

fica como de acidez alta esta lluvia. En este caso el modelo de trayectoria inversa muestra (figura 4) un arrastre desde la zona nororiental de Cuba, moviéndose la masa de aire todo el tiempo sobre tierra y sin ganar mucho en altura, lo cual permite incorporar los contaminantes presentes en esta capa baja de la troposfera.

El mapa se corresponde con aquellas configuraciones del campo bórico que tienen lugar cuando la región central del anticiclón del Atlántico se aleja sensiblemente de nuestras áreas, permitiendo una mayor modificación de sus características iniciales, debido a una más prolongada interacción océano-atmósfera.

Esta situación suele presentarse cuando el anticiclón Atlántico se encuentra muy retardado y largamente extendido. Se corresponde con el TSS V, zona de convergencia, asociado con una onda. La masa de aire tropical, al desplazarse lejos de su región de origen, en su extensa trayectoria oceánica se modifica considerablemente, humedeciéndose y ganando en inestabilidad en los niveles bajos, lo cual facilita la aparición de nubes de moderado desarrollo con actividad de chubascos y turbonadas, aunque de menor intensidad bajo la influencia de las ondas tropicales.

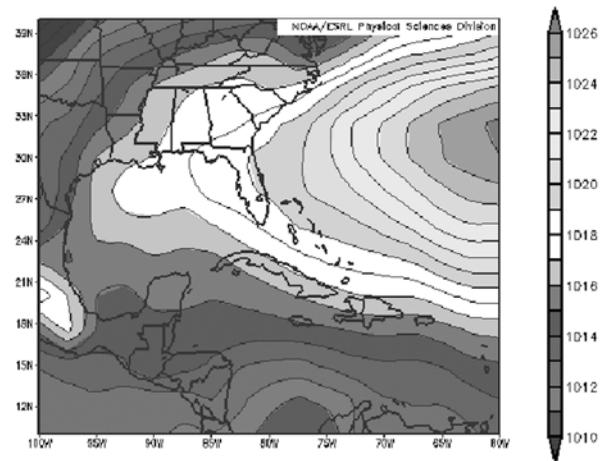
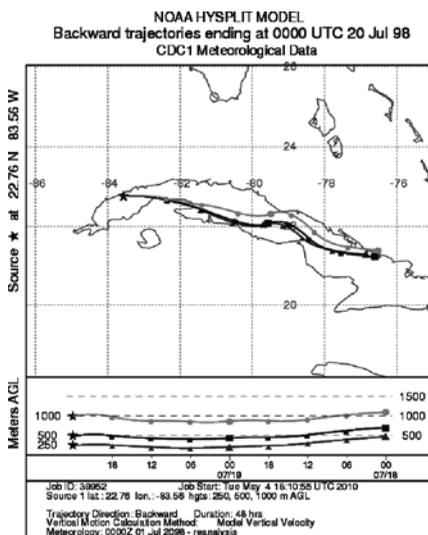


Fig. 4. Flujo del este (20 de julio de 1998). A la izquierda la corrida del modelo y a la derecha la representación del mapa sinóptico de superficie.

Conclusiones y recomendaciones

La adecuada utilización del modelo HYSPLIT permitió conocer el origen y trayectoria de los contaminantes que han contribuido a la ocurrencia de precipitaciones con características de alta acidez en la zona occidental de Cuba.

Se reconoce que la clasificación utilizada para los tipos de situaciones sinópticas también es una adecuada herramienta para conocer la procedencia y las características de las masas de aire que han provocado las precipitaciones estudiadas.

Las muestras colectadas de precipitaciones individuales por sus características físico-químicas se clasificaron como ácidas, y presentaron valores de pH que oscilaron entre 4.0 y 4.72, lo cual permite clasificarlos como de acidez alta. También un grupo de las muestras analizadas presentaron acidez moderada moviéndose entre 4.71 y 5.0 los valores reportados en esta zona boscosa del occidente de Cuba.

Se recomienda continuar los estudios y el monitoreo sistemático sobre la procedencia y origen de las masas de aire que influyen en las características de la composición química y física de nuestra atmósfera por las repercusiones ecológicas que estas tienen sobre los ecosistemas naturales y construidos, y por los posibles efectos nocivos potenciales que los contaminantes pueden provocar en un futuro sobre la agricultura y los bosques de esta región.

Bibliografía

- Cuesta, O. (1995): Caracterización de las concentraciones de los principales compuestos del nitrógeno atmosférico en Cuba y su relación con los tipos de situaciones sinópticas. Tesis en opción al Grado de Doctor en Ciencias Geográficas, pp. 104. INSMET, La Habana.
- Cuesta, O., M. González, P. Ortiz, A. Collazo (2000): Repercusiones Ecológicas de los compuestos del nitrógeno atmosférico en Cuba. *Rev. Cub. Met.* Vol. 7, No. 1, 2000, pp 55-54.
- Cuesta, O., A. Collazo, M. González and A. Wallo (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.
- Draxler, R.R. and Rolph, G.D., 2010. HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.
- Draxler, R. 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.
- Instituto Nacional de Ecología (2005): Dirección General de Investigación sobre la Contaminación Urbana y Regional, Investigación sobre Calidad del Aire, Tipos de modelos. Publicación electrónica http://www.ine.gob.mx/dgicur/calair/tipos_modelos.html
- MORCCA, (2003): Manual de Operaciones de la Red Control la Contaminación Atmosférica. Instituto de Meteorología. Centro de Contaminación y Química de la Atmósfera. Ciudad de la Habana. Cuba. pp. 36. La Habana.
- Lapinel, B. (1988): La circulación y las características espacio temporales de las lluvias en Cuba. Tesis en opción al grado de Dr. En Ciencias Geográficas, 120 pp. INSMET, La Habana.
- López Lee Rosemary, Mercedes Martínez Gandara, Osvaldo Cuesta Santos y Manuel Álvarez Prieto (2008): Estudio regional de la acidez de la lluvia en Cuba. Publicación Electrónica, ISBN, 978-959-282-079-1, Memorias de la Convención Internacional Trópico 2008, Ciudad de la Habana, 16 – 20 de Junio de 2008.

Rodríguez, A. (1991): Composición química de las precipitaciones de sistemas meteorológicos y acidez de la lluvia en Cuba. Tesis en opción a doctor en ciencias geográficas, La Habana, Cuba.

Rolph, G. D. (2010): Real-time Environmental Applications and Display sYstem (READY) Website (<http://ready.arl.noaa.gov>). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.

Seinfeld J.H.; Pandis S.N. (1998): Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change. John Wiley and Sons Inc. EUA.

W.M.O. (2004): Manual for the GAW Precipitation Che-

mistry Programme - Guidelines, Data Quality Objectives and Standard Operating Procedures. WMO TD No. 1251, Geneva.

Agradecimientos

Agradecemos a todos los especialistas del Instituto de Meteorología que han contribuido de una u otra forma con los datos utilizados en este trabajo.

Abstract

This paper assimilates and it applies the HYSPLIT model to know the backward trajectory by air masses of a individual samples set of acid rain that have resulted monitoring chemical precipitations in La Palma Station Regional Air Pollution La Palma, Pinar del Río; located in an tropical forest ecosystem. As part of this analysis the Kinds of Synoptic Situations associated to air masses are studied that caused pH with very low values. Three cases are explained with different origins.

Key words: HYSPLIT model, backward trajectory, acid rain.