

# Análisis de la contaminación transfronteriza y local de los compuestos gaseosos precursores de la deposición ácida húmeda y formación de ozono en Cuba

*The local and transboundary air pollution analysis from precursor compounds (NO<sub>x</sub>)  
of wet deposition and ozone formation in Cuba*

**Arnaldo E. Collazo**

Centro de Contaminación y Química Atmosférica, Instituto  
de Meteorología de Cuba, Cuba, Telf. (53 7) 867 0711,  
Email: arnaldo.collazo@insmet.cu

**Raúl G. E Morales**

Laboratorio de Química Ambiental de la Facultad Ciencias,  
Universidad de Chile, Chile, Telf. (56 2) 9787167,  
Email: correo@raulmorales.cl

**Luis Morales**

Departamento de Recursos Naturales Renovables  
de la Facultad de Ciencias Agronómicas y Forestales,  
Universidad de Chile, Chile, Telf. (56 2) 9785988,  
Email: lmorales@renare.uchile.cl

*Recibido: 10 febrero, 2012; aceptado: 30 junio, 2012*

## Resumen

El análisis de las contaminación transfronteriza y local de los compuestos precursores NO<sub>x</sub>, de la deposición ácida húmeda y de la formación de ozono en Cuba, permitió recopilar información sobre la distribución espacial de las emisiones de los compuestos gaseosos NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub> en el dominio de estudio, por lo que se realizó un inventario de emisiones de fuentes de combustión (termoeléctricas) locales y transfronterizas (sureste de los Estados Unidos). Este estudio caracterizó los tipos de situaciones sinópticas en los períodos poco lluvioso y lluvioso de 2007, en asociación con las trayectorias inversas de masas de aire, utilizando el modelo HYSPLIT\_4, que tienen incidencia en la distribución de las emisiones de los precursores gaseosos NO<sub>x</sub> de origen local y transfronterizo.

La ejecución del modelo NNR/ CALMET/ CALPUFF permitió caracterizar las variaciones de las concentraciones de los compuestos precursores gaseosos NO<sub>x</sub> y las tasas de deposición húmeda de nitrato. También se estimó la concentración de ozono troposférico a partir de la implementación de un modelo euleriano. El análisis de los resultados muestra que los valores estimados de los óxidos de nitrógeno

NO<sub>x</sub> corresponden con los niveles observados de fondo regional (inferiores a 2 µg/m<sup>3</sup>) y la deposición húmeda de nitrato (15 ng/m<sup>2</sup>-30 ng/m<sup>2</sup>) demostró que las mayores tasas aparecen en zonas con emisiones antropogénicas locales de precursores de la acidez.

Por su parte, los valores de ozono troposférico calculados mediante el modelo euleriano implementado constituyen un aporte al conocimiento de los niveles de fondo global que se estarían produciendo debido a la limitación del inventario de emisiones de fuentes utilizado. A pesar de la simplicidad y las limitaciones de la información preexistente, los resultados alcanzados permiten contar con una herramienta adecuada para la planificación y la gestión de la calidad del aire en Cuba.

**PALABRAS CLAVE:** Contaminación transfronteriza, tipos de situaciones sinópticas, deposición húmeda ácida, inventario de emisiones, HYSPLIT\_4, NNR/CALMET/CALPUFF, ozono troposférico, modelo euleriano, gestión de la calidad del aire.

## Abstract

The local and transboundary air pollution analysis of precursor compounds NO<sub>x</sub> of wet acid deposition and ozone formation in Cuba, allowed getting in-

formation on the spatial distribution of emissions of  $\text{NO}_x$  and  $\text{SO}_2$  gaseous compound in the domain study, making an emissions inventory from local (Cuban power plants) and transboundary combustion sources (Southeast U.S.).

This study characterized spatial synoptic classification in the dry and rainy season of 2007 in relationship with the back trajectories of air masses using HYSPLIT\_4 model, that impact the distribution of gaseous precursor emissions from  $\text{NO}_x$  local and transboundary emission sources. Besides, the implementation of the model NNR/ CALMET/ CALPUFF allowed featuring the variations in the concentrations of gaseous precursor compounds  $\text{NO}_x$  and wet deposition of nitrate. Also, it was estimated the surface ozone level concentration from the implementation of an Eulerian model.

The result discussion shows that the estimated values of nitrogen oxides  $\text{NO}_x$  correspond to the regional background levels (less than  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) and wet deposition of nitrate ( $30\text{--}90 \text{ ng}/\text{m}^2$ ) verified that showed the highest rates in areas with local anthropogenic emissions of precursors of acidity.

On the other hand, the values of surface ozone level concentrations calculated from the Eulerian model used, contributed as support to the knowledge about the global background levels that would be produced due to the limitation of the sources emissions inventory used.

Despite of simplicity and limitations of pre-existing information, the results from modeling the transport and chemical transformations of precursor compounds  $\text{NO}_x$  at regional level have allowed an adequate tool for air quality management and planning in Cuba.

**KEYWORDS:** transboundary air pollution, spatial synoptic classification, wet acid deposition, emissions inventory, HYSPLIT\_4, NNR/CALMET / CALPUFF, surface ozone level, Eulerian model, air quality management

## Introducción

En la actualidad, las fuentes emisoras locales y regionales son la causa principal de la mayoría de los problemas globales de contaminación del aire, por cuanto conforman una evidencia creciente de que muchos contaminantes del aire son transportados en una escala hemisférica o global (Borge *et al.*, 2007). Estos flujos pueden ser importantes para entender los problemas de contaminación del aire en los centros poblados y sus impactos sobre áreas remotas, por lo cual la necesidad de reducir la exposición a la contaminación es aún un asunto pendiente que, además, se estima que se seguirá incrementando durante las próximas dos décadas, a pesar de todos los esfuerzos que se realizan por reducir las emisiones gaseosas de los óxidos de nitrógeno y azufre (Aherne *et al.*, 2010).

En Cuba, en las últimas dos décadas, se ha venido observando un incremento en la frecuencia del fenómeno de las lluvias ácidas, según los estudios e investigaciones más recientes (López, 2007), las cuales han encontrado una contribución de las fuentes locales (naturales y antropogénicas) de contaminantes gaseosos precursores de los procesos de acidificación, y que se suman a las probables contribuciones provenientes de áreas geográficas vecinas. En este punto, la modelación matemática es una valiosa herramienta que permite integrar y sintetizar el conocimiento para una mejor comprensión de los procesos atmosféricos, así como para dar respuesta a diferentes interrogantes desde la gestión de la calidad del aire en el país (Morales, 2006).

La experiencia cubana en la modelación de la dispersión, el transporte y las transformaciones químicas de los contaminantes atmosféricos ha sido desarrollada, fundamentalmente, para abordar problemas de escala local alrededor de fuentes fijas de emisiones industriales. Sin embargo, Cuba debe enfrentar problemas que rebasan el ámbito local. Entre los problemas atmosféricos regionales que afectan

están la lluvia ácida y la formación de ozono troposférico (López, 2007).

Por tales motivos, estos modelos de transporte, dispersión, transformaciones químicas y deposición de los contaminantes atmosféricos resultan importantes para los sistemas de gestión de la calidad del aire y son muy utilizados por los organismos encargados de controlar la contaminación atmosférica, tanto para identificar las contribuciones de las fuentes, como para ayudar en el diseño de estrategias eficaces con vistas a reducir las emisiones de los contaminantes dañinos (WHO, 2005).

Por todo lo anterior, el presente estudio tiene como propósito principal el análisis de la contaminación atmosférica transfronteriza y local de los compuestos gaseosos precursores  $\text{NO}_x$  del proceso de deposición ácida húmeda, y la formación de ozono en Cuba y sus inmediaciones, utilizando para ello una combinación de las observaciones y los modelos atmosféricos como un esquema que permite enfrentar este tipo de problemas y acercarse a entender los fenómenos atmosféricos más propios de la región que envuelve a la isla de Cuba.

## Materiales y métodos

### Dominio del estudio

El dominio de estudio está comprendido entre  $14^\circ$  -  $39^\circ$  de la latitud norte (N) y  $90^\circ$  -  $70^\circ$  de longitud oeste (W), y la República de Cuba se encuentra situada en la cuenca del Caribe, entre los  $19^\circ 49'36''$  y  $23^\circ 17'09''$  de latitud norte y los  $74^\circ 07'52''$  y  $84^\circ 54'57''$  de longitud oeste.

### Base de datos meteorológicos globales

El estudio consideró la utilización de dos conjuntos de datos provenientes de la Base de Datos NNR: el primero, solo contempló los valores de los campos meteorológicos de superficie; el segundo, los valores correspondientes al perfil atmosférico vertical, este

último expresado en unidades de presión (*hectopascal*, hPa) consideradas como superficies homogéneas



Figura 2.1 Dominio del estudio

de presión o niveles mandatorios: 1 000 hPa, 925 hPa, 850 hPa, 700 hPa, 600 hPa y 500 hPa. Se utilizó una rejilla de datos de corto plazo (*short-term*) que entrega valores promedios cada 6 horas para el año 2007.

### Procesamiento de las imágenes NNR

La rejilla de valores de los campos meteorológicos provenientes del NNR se descargó desde archivos de extensión en formato binario (.NetCDF), con una resolución espacial de  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  latitud-longitud; los datos se procesaron con el programa GrADS (el cual es gratuito) que permite manejar y visualizar los archivos provenientes de la base de datos del estudio. Estos archivos en formato (.nc) fueron convertidos en archivos binarios, con el fin de facilitar el manejo de los mismos programas realizados en lenguaje Visual Basic para Excel.

La principal deficiencia de los datos del proyecto NNR es la baja resolución espacial dado que el proyecto está enfocado, principalmente, al estudio de escala global, pero, en el caso del presente estudio, fue adecuado para el tipo de escala regional. Los datos generados por el proyecto NNR corresponden

a valores promedios cada 6 horas, que es la menor resolución temporal disponible; sin embargo, para la ejecución del módulo meteorológico CALMET del sistema de modelación CALPro se necesita, como entrada, ingresar datos horarios para caracterizar mejor las variaciones diarias en la simulación.

En aras de solucionar esto, los datos cada 6 horas fueron interpolados temporalmente y se obtuvieron datos horarios para todo el período de estudio. Se aplicó la interpolación de tipo segmentaria, conocida como Spline, que consiste en la construcción de un polinomio de bajo orden a un subconjunto de datos.

### **Inventario de emisiones para fuentes de combustión estacionarias locales y externas**

En el inventario de emisiones para fuentes de combustión estacionarias locales, solamente fueron consideradas las ocho centrales termoeléctricas (CTE) del Sistema Electroenergético Nacional. Para ello, se utilizó el Inventario de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos del Sector de Generación Energía Eléctrica (Turtós *et al.*, 2007), ajustadas al tiempo de operación de las plantas (o eventualidad), así como al Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero.

Las emisiones fueron medidas y estimadas teniendo en cuenta las metodologías y los factores de emisión AP-42 de la Agencia de Protección de los Estados Unidos para plantas generadoras que consumen petróleo crudo con alto contenido de azufre (4 %-7 %) (EPA, 1998). La información de las fuentes de combustión estacionarias externas fueron tomadas del Inventario Nacional de Emisiones Atmosféricas de los Estados Unidos (US NEI, 2007), donde se seleccionaron las fuentes fijas de la generación eléctrica para 12 estados del sureste de los Estados Unidos. Se incluyeron solo las fuentes cuya ubicación geográfica pertenecen al dominio del estudio.

### **Distribución espacial de los patrones meteorológicos en los períodos poco lluvioso y lluvioso asociados a las contribuciones desde fuentes de combustión estacionarias locales y externas**

Las trayectorias fueron calculadas utilizando el Modelo Híbrido Lagrangiano de Trayectoria Integrada para Partículas (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model, HYSPLIT\_4). Por consiguiente, la aplicación del modelo de trayectorias HYSPLIT\_4 (Draxler, 2009) cumplió dos propósitos fundamentales: 1. Determinar cuáles regiones afectaron con mayor frecuencia la calidad del aire en la localidad de Casablanca, La Habana; y 2. Caracterizar la relación entre las trayectorias y las condiciones sinópticas típicas durante el período de estudio.

Con miras a facilitar la caracterización de la dirección de los recorridos de masas de aire se separó cada trayectoria de masa de aire de 48 horas en dos subtrayectorias de 24 horas, y a partir de un gráfico de tipo radial se representaron las frecuencias acumuladas por cada dirección de las subtrayectorias de 0 horas a 24 horas. En este estudio fue examinada la relación entre estos dos métodos esencialmente independientes de la clasificación climática a escala sinóptica: el modelo de trayectorias regresivas y progresivas de masas de aire HYSPLIT\_4 y la clasificación de Tipos de Situaciones Sinópticas de masas de aire para Cuba (Lapinel, 1989) en 2007.

Según de la metodología propuesta por Lapinel (1989), se confeccionó una base de datos correspondiente al registro anual para la clasificación de los Tipos de Situaciones Sinópticas (TSS) utilizándose los archivos correspondientes a los mapas sinópticos de las observaciones meteorológicas de superficie y perfil vertical (Digital Atmosphere Software), las imágenes de satélites meteorológicos, así como el resumen operativo del Estado General del Tiempo (EGT) emitidos por del Centro Nacional de Pronóstico del Tiempo, Instituto de Meteorología de Cuba; por tan-

to, el catálogo de TSS seleccionado comprende nueve tipos principales y veinte subtipos.

### Simulación de los flujos de concentraciones del contaminante ( $\text{NO}_x$ ), y de la deposición ácida húmeda del nitrato ( $\text{NO}_3^-$ )

En el presente estudio se utilizó el sistema de modelación CALMET/CALPUFF. En la ejecución del módulo CALMET fueron empleados los datos meteorológicos para 2007, a partir de 90 estaciones de aire superior y 91 estaciones de superficie con vistas a generar los campos meteorológicos diagnosticados. Las capas verticales fueron seleccionadas a las alturas de 0,20 m, 110 m, 754 m, 1 443 m, 2 983 m, 4 166 m y 5 521 m para los niveles de presión mandatarios y una atmósfera estable de 1 000 hPa, 925 hPa, 850 hPa, 700 hPa, 600 hPa y 500 hPa, respectivamente. Por su parte, la simulación con el módulo CALPUFF permitió calcular las concentraciones de los compuestos gaseosos del nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) y los flujos de deposición ácida húmeda del nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) (Scire *et al.*, 2000a).

Los datos meteorológicos de entrada al módulo CALPUFF deben estar totalmente caracterizados por condiciones meteorológicas y de los vientos variables tridimensionalmente y en el tiempo, lo que se hace por lo general con CALMET, este último calcula las estructuras de viento del área de estudio mientras que CALPUFF calcula la dispersión de contaminantes en los sitios receptores, tomando en cuenta campos de viento tridimensionales complejos, lo cual es de importancia particular para las fuentes emisoras ubicadas en áreas costeras (Scire *et al.*, 2000b).

El módulo CALPUFF calcula las concentraciones en los receptores distribuidos en el dominio de estudio, a diferentes horas, tales como el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y las especies de la familia del nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ). Además, tiene la peculiaridad de incluir un modelo simple de transformación química que permite estudiar y calcular algunas especies secundarias, como los sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y los nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), que han to-

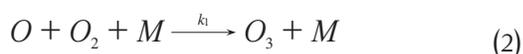
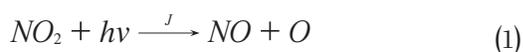
mado mucha relevancia por sus efectos potenciales sobre la salud humana, de forma que el sistema ha sido utilizado en estudios que sirven como base conceptual para estos análisis (López, 2007).

Los archivos de salida primarios de CALPUFF contienen los flujos de concentraciones y deposiciones para cada hora, evaluados en los receptores seleccionados y en todo el dominio del estudio. El módulo CALPOST se utiliza para procesar los archivos de salida de CALPUFF que aportan tablas en las cuales de resumen los resultados de la simulación.

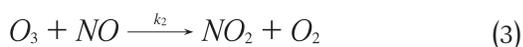
### Formación de ozono troposférico

El cálculo de las concentraciones del ozono troposférico se realizó a partir de un modelo estático (euleriano) que utiliza como datos de entrada los flujos de las concentraciones de  $\text{NO}_2$  y  $\text{NO}$  bajo condiciones meteorológicas especiales y el valor de la radiación del punto geográfico de interés.

La base de la formación de ozono es la fotólisis del dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ), por las reacciones siguientes (Seinfeld y Pandis, 2006):



Donde  $hv$  representa la energía fotoquímica proveniente de la radiación ultravioleta (o un fotón),  $k$  representa la constante de fotólisis de la reacción del  $\text{NO}_2$ , y  $hv$  y  $M$  representan  $\text{N}_2$  u  $\text{O}_2$  u otra molécula que absorba la energía excedente de la reacción. Una vez formado el ozono, este es rápidamente disociado por la reacción, como sigue:



La molécula de  $\text{NO}_2$  es regenerada y, en la ausencia de otras especies, se alcanza un estado estacionario a través de las reacciones [1] y [3], en la cual la concen-

tración de ozono puede estimarse por la expresión siguiente:

$$[O_3] = \frac{J [NO_2]}{k_2 [NO]}$$

En la troposfera natural, estas reacciones, normalmente, resultan en una concentración de ozono de 15 a 45 partes por billón (ppb) (Altshuller y Lefohn, 1996). Las emisiones de precursores, la dilución, el transporte, las reacciones químicas y el estado físico de la atmósfera forman un complejo que regula los cambios observados. La proporción de la radiación UV en superficie es baja (menos de 10 %), pero los fotones UV pueden causar reacciones fotolíticas y fotoquímicas en la materia.

Los factores que determinan la tasa o constante de fotólisis de una especie química en la atmósfera son los siguientes:

1. El flujo actínico o número de fotones que pasa a través de un área en el tiempo y que depende de la longitud de onda, el ángulo cenital, la altitud, el albedo, las nubes, etc. (expresado en unidades de fotones  $cm^{-2}$ ).
2. La sección eficaz o capacidad de las especies de absorber fotones (en  $cm^2$  molécula<sup>-1</sup>).
3. El rendimiento cuántico asociado al destino que la molécula tiene al absorber un fotón, es decir, el número de moléculas que siguen un camino de reacción particular, después de absorber un fotón, dividido por el número de moléculas que absorben los fotones en el rango de longitud de onda, fracción expresada entre cero y uno. La constante o tasa de fotólisis  $J$  es de la forma siguiente:

$$J_i = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \sigma(\lambda) \cdot \phi(\lambda) \cdot F(\lambda, t) d\lambda$$

En el procedimiento de cálculo se realizaron los pasos siguientes:

**PASO 1.** Se seleccionaron los meses con condiciones meteorológicas favorables para la formación de

ozono troposférico (en el dominio y el período del presente estudio). Con miras a la selección de los días dentro de los meses se consideran los incisos siguientes:

- a) Explorar los archivos correspondientes a las salidas de la ejecución del modelo de trayectorias HYSPLIT\_4, para seleccionar los días dentro del mes con trayectorias de masas de aire de origen continental (sureste de los Estados Unidos).
- b) La formación de ozono troposférico es favorable bajo condiciones meteorológicas especiales: la influencia de sistemas de altas presiones a escala sinóptica, los días cálidos, secos, despejados y de vientos débiles. Por tal motivo, para la selección de los días se exploró la Base de Datos Meteorológicas de la estación de Casablanca en las variables de interés: la dirección del viento (en grados), la nubosidad (en octavos) y la precipitación (mm).
- c) Explorar la Base de datos de la clasificación de TSS para el mes de interés.

**PASO 2.** Se determinó el flujo actínico  $F(\lambda, t)$  que se obtuvo de las salidas provenientes de la ejecución del modelo de transferencia radiactiva TUV Model del NCAR (Madronich, 1987); [http://cprm.acd.ucar.edu/Models/TUV/Interactive\\_TUV](http://cprm.acd.ucar.edu/Models/TUV/Interactive_TUV).

Solo consideraremos las horas sol desde las 7:00 (12:00 GMT) hasta las 17:00 horas (22:00 GMT) y las longitudes de onda que se han de considerar son, básicamente, radiación UV A y B, con una ligera porción del espectro visible a partir de 400 nm.

**PASO 3.** Cálculo de la constante de fotólisis ( $J$ ) a partir de la expresión (2).

**PASO 4.** Se procedió a la ejecución del modelo CALPUFF solo para los meses seleccionados en el paso (2), cambiando el mecanismo químico (MESOPUFF II a RIVAD/ARM3), y considerando estos dos nuevos puntos receptores para obtener las concentraciones de  $NO_2$  y  $NO$ , respectivamente.

**PASO 5.** Se obtuvieron las concentraciones de ozono por la implementación del modelo descrito por la expresión (1), a través de una planilla Microsoft Excel 97 para facilitar los cálculos.

## Análisis y discusión de los resultados

### Distribución de las emisiones locales

La distribución espacial de las emisiones estudiadas provenientes de fuentes locales se pueden observar en la figura 3.1. Se aprecia que las mayores emisiones de precursores gaseosos  $\text{NO}_x$  provienen de las termoeléctricas de Mariel (que se localiza en la costa norte de la provincia de La Habana) y de Felton (ubicada en el norte de la provincia de Holguín), respectivamente. Además, ambas fuentes locales de emisiones contribuyen a 35,4 % del balance total del inventario de emisiones de  $\text{NO}_x$  realizado en el estudio y aproximadamente 9 % al balance total del Inventario Nacional de Emisiones y Remociones de Gases de Invernadero para Cuba.

Por su parte, la figura 3.2 muestra las emisiones de  $\text{SO}_2$  provenientes de las fuentes locales (termoeléctricas) distribuidas a lo largo del territorio nacional, destacándose, nuevamente, las de Felton y Mariel entre las de emisiones mayores, al igual que la Antonio Guiteras (ubicada en la provincia de Matanzas),

las cuales contribuyen a 51,3 % del balance total del inventario de emisiones de  $\text{SO}_2$  realizado en el estudio y 40,2 % del balance total Nacional (López *et al.*, 2009).

### Análisis de las trayectorias inversas

La figura 3.3 muestra (en su lado izquierdo) la distribución anual de las trayectorias inversas de masas de aire. En 2007, la cifra de 23,7 % de las que llegan a Casablanca y La Habana provienen del noreste (NE), lo cual sugiere que las zonas ubicadas en el noreste del continente y el Caribe norte oriental de la localidad de Casablanca, La Habana, frecuentemente, influyen en su calidad del aire.

Ahora bien, en la figura 3.4 aparece representada la distribución de las trayectorias inversas de masas de aire durante los períodos poco lluvioso (noviembre-abril) y lluvioso (mayo-octubre) de 2007; donde se muestra una mayor frecuencia de ocurrencia de las contribuciones provenientes de fuentes de emisiones externas en el período poco lluvioso (31,7 %) contra 10,6 % para el período lluvioso. Mientras que la mayor contribución desde fuentes de emisiones locales ocurre durante el período lluvioso (17,8 %), en contraste con solo 8,5 % en el período poco lluvioso. Debe señalarse que los porcentajes que aparecen en la categoría *otras fuentes* corresponden a las fuentes



Figura 3.1 Distribución de las emisiones de  $\text{NO}_x$  provenientes de fuentes locales

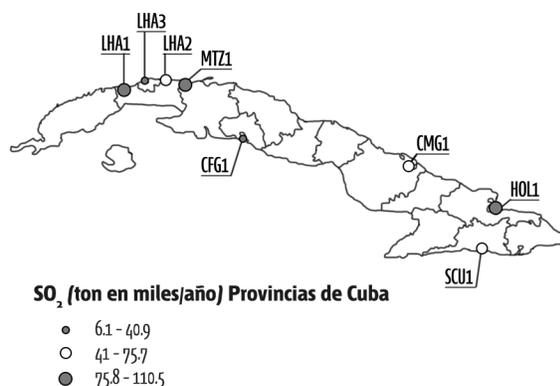


Figura 3.2 Distribución de las emisiones de  $\text{SO}_2$  provenientes de fuentes locales

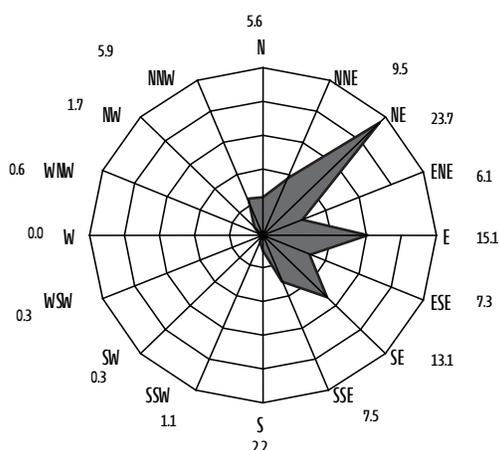


Figura 3.3 Distribución de Frecuencia Anual de las trayectorias inversas de las masas de aire. Casablanca, La Habana, 2007.

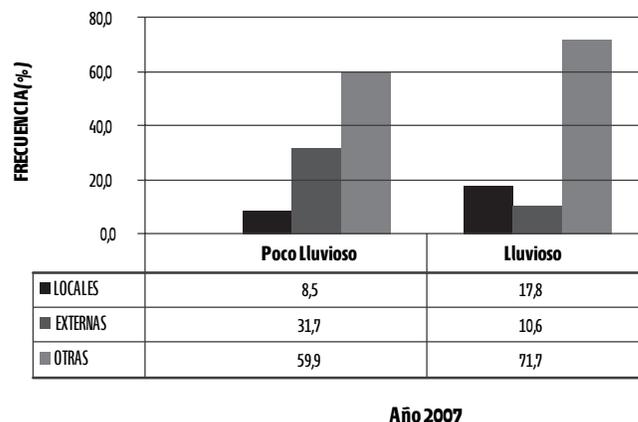


Figura 3.4 Distribución de frecuencias de las trayectorias de masas de aire. Casablanca, 2007.

de emisiones externas que no fueron utilizadas en el inventario de emisiones realizado en el estudio.

La figura 3.5 muestra que para el período lluvioso del año (mayo-octubre) existió predominio del TSS, tipo Va, *zonas de convergencia* (ZC) con flujos del este, relacionadas con áreas de bajo barómetro y bajas frías superiores, con la presencia de ondas y hondonadas sobre el territorio nacional asociadas con una mayor contribución de trayectorias de masas de aire provenientes desde fuentes locales, con un valor de frecuencia de ocurrencia de 17,8 % en todo el período 2007.

En el período poco lluvioso (noviembre-abril) (Fig. 3.6) se observa un predominio del TSS, tipos VIIa y VIIb, *anticiclón migratorio* (AM), altas polares típicas que producen subsidencia del aire polar tienden a desplazarse del sureste al este dejando sobre el territorio bajas temperaturas y vientos de componente norte, asociados con una mayor contribución de las trayectorias de masas de aire desde fuentes externas, alcanzándose un valor de frecuencia de 31,5 %, exceptuando los meses de enero y febrero, que se caracterizaron por el TSS, VIIc, *frente frío estacionario* (FEE).

### Comportamiento de las concentraciones de NO<sub>x</sub> obtenidos por el modelo CALPUFF

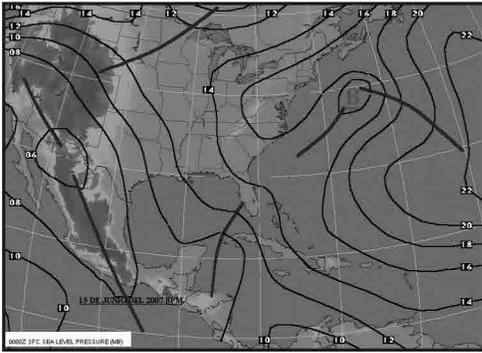
La figura 3.7 muestra los resultados del comportamiento de las concentraciones promedio horaria mensual del NO<sub>x</sub> en la localidad rural de Falla (Ciego de Ávila, Cuba) para los períodos poco lluvioso de 2007. En general, los valores de las concentraciones estimadas de NO<sub>x</sub> por el modelo utilizado se corresponden con las concentraciones de fondo regional (Cuesta *et al.*, 2009).

Se puede observar que los valores máximos relativos se alcanzan en las primeras horas de la mañana (entre las 5:00 horas y las 9:00 horas) y en la noche, debido a una mayor acumulación de los contaminantes y el predominio de vientos débiles y(o) en calma (Cuesta *et al.*, 2009), mientras que los valores mínimos absolutos se consiguen en las horas del mediodía, por una mayor dispersión de este contaminante.

La figura 3.8 muestra las concentraciones de NO<sub>x</sub> para el período lluvioso del año. La diferencia en los valores mínimos mayores en el período lluvioso se justifica dado que ocurren los valores casi nulos como consecuencia de la limpieza de la atmósfera por las lluvias conectivas típicas del verano (período lluvioso) en las latitudes tropicales. En estos meses es cuando existe una alta frecuencia de contribucio-

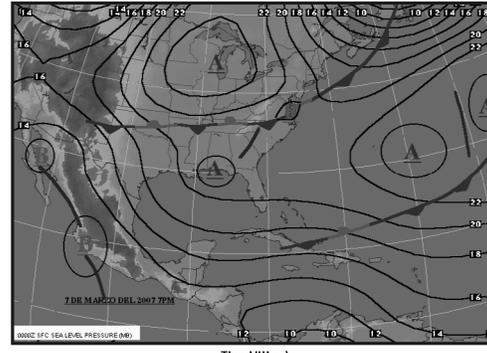
Análisis de la contaminación transfronteriza y local de los compuestos precursores de la deposición ácida húmeda y formación de ozono en Cuba gaseosos

Tipo de Situación Sinóptica (TSS)



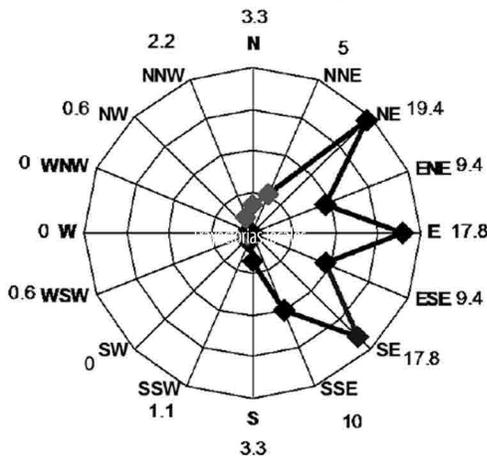
Tipo Va (ZC)

Tipo de Situación Sinóptica (TSS)



Tipo VIII a.)

Trayectorias de masas de aire



Trayectorias de masas de aire

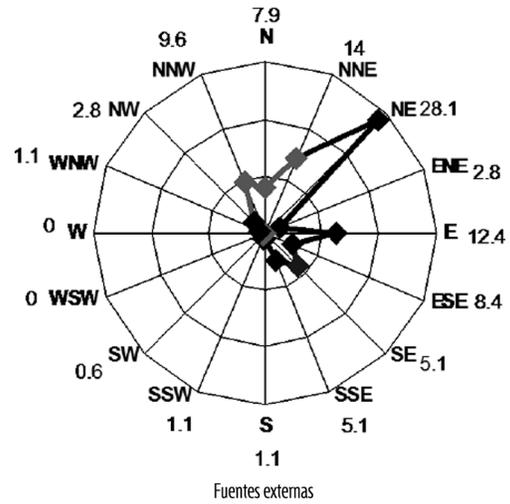


Figura 3.5 Relación entre TSS y las trayectorias de masas de aire, Periodo lluvioso, Casablanca, 2007.

Figura 3.6 Relación entre TSS y las trayectorias de masas de aire, Periodo Poco lluvioso, Casablanca, 2007.

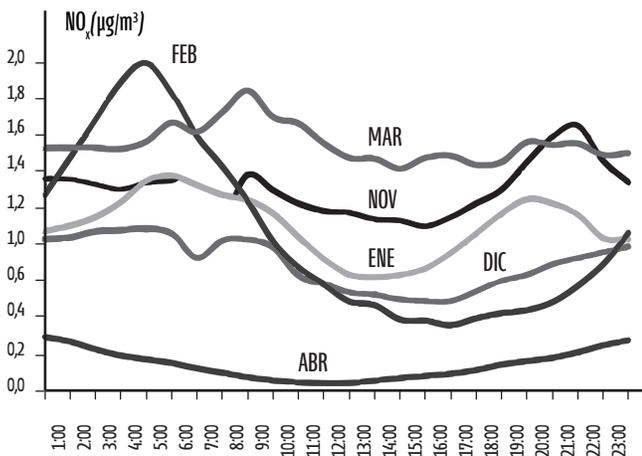


Fig. 3.7 Comportamiento promedio horario mensual de las concentraciones de NO<sub>x</sub> para el periodo poco lluvioso (Falla, 2007).

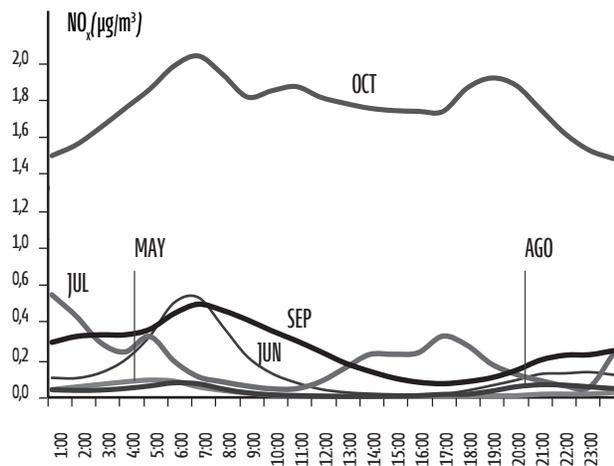


Fig. 3.8 Comportamiento promedio horario mensual de las concentraciones de NO<sub>x</sub> para el periodo lluvioso (Falla, 2007).

nes desde las fuentes locales y otras externas cuyas emisiones no se cuantificaron en el presente estudio.

Al comparar las concentraciones de NO<sub>x</sub> a partir de la simulación con CALPUFF con los valores promedios mensuales históricos para el período desde 1985 hasta 2006, medidos en la estación de Falla (Fig. 3.9), se aprecia una mejor correspondencia entre los valores alcanzados en el período poco lluvioso que en el período lluvioso, donde el modelo tiende a subestimar los valores de las concentraciones.

Se efectuó una corrección a los valores de las concentraciones de NO<sub>x</sub> para el período lluvioso, teniendo en cuenta el volumen total de las emisiones de NO<sub>x</sub> del Inventario de Emisiones realizado en este estudio (etapa I), cuyo valor es de 21,7 Gg/año, y el valor del Inventario Nacional de Emisiones y Remociones de Gases de Invernadero para Cuba (López *et al.*, 2009), que es de 83,65 Gg/año para el sector de Energía. Asumiendo que solo se consideró la mitad del año, entonces, el volumen de emisiones de NO<sub>x</sub> total e inventariado se reduce a la mitad (10,8 y 41,83 Gg/año, respectivamente). Se deduce lo siguiente:

$$FI = 10,8/41,8 = 0,25$$

Por tanto, podemos establecer un factor de corrección para las concentraciones estimadas por el modelo a partir de la expresión siguiente:

$$C_{ec} = (F \cdot C_h + (1-F) \cdot C_e) / 2 \cdot F \quad (1)$$

Donde C<sub>ec</sub> es el valor de la concentración de NO<sub>x</sub> estimada corregida, F<sub>1</sub> es la fracción del volumen de emisión total de NO<sub>x</sub> en el inventario del estudio, C<sub>h</sub> es el valor de la concentración de NO<sub>x</sub> histórica medida y C<sub>e</sub> es el valor de la concentración de NO<sub>x</sub> estimada.

La figura 3.10 muestra el comportamiento de las concentraciones estimadas corregidas para el período lluvioso aplicando la ecuación (1).

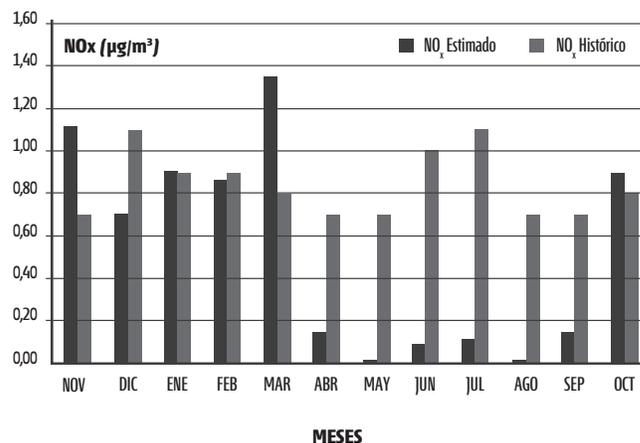


Figura 3.9 Relación entre el promedio horario mensual de las concentraciones de NOx estimado e histórico, Falla, 2007.

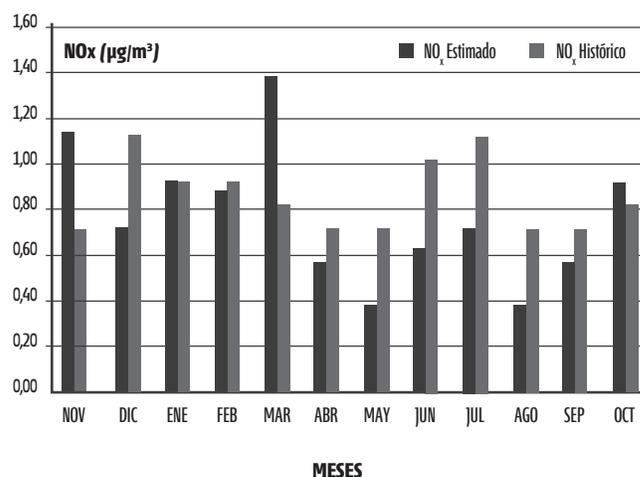
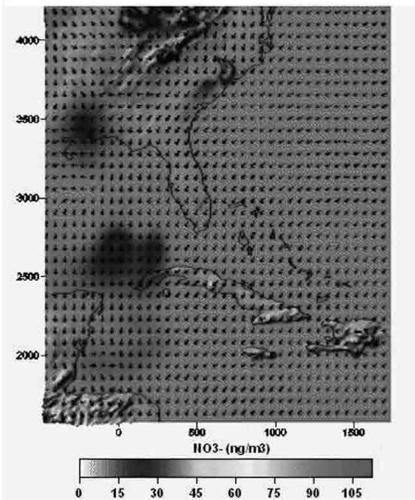


Fig. 3.10 Relación entre el promedio horario mensual de las concentraciones de NOx estimado e histórico corregidas para el período lluvioso (Falla, 2007).

### Distribución espacial y temporal de la deposición húmeda del nitrato a partir de las salidas de CALPUFF

La distribución espacial diaria del depósito húmedo del nitrato obtenido de la ejecución del módulo CALPUFF se asoció con las trayectorias de las masas de aire calculadas por el HYSPLIT\_4, provenientes de fuentes externas en el período poco lluvioso (abril-noviembre) (Fig. 3.11); los valores de las deposiciones promedio diarias se encuentran en el rango de 15 ng/m<sup>2</sup> a 30 ng/m<sup>2</sup> de nitrato. A pesar de ser más bajas que las obteni-

Distribución espacial diaria del depósito del Nitrato, 21/04/2007



NOAA HYSPLIT MODEL  
Backward trajectories ending at 0000 UTC 22 Apr 07  
GDAS Meteorological Data

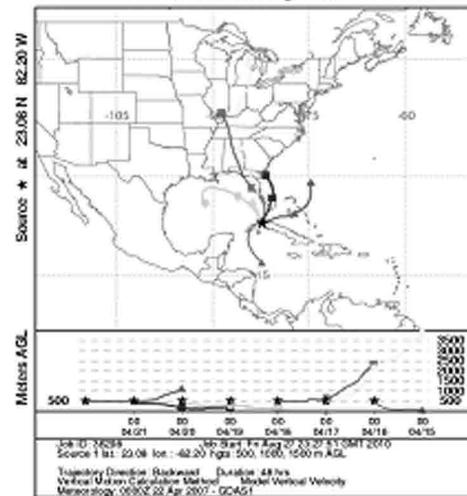
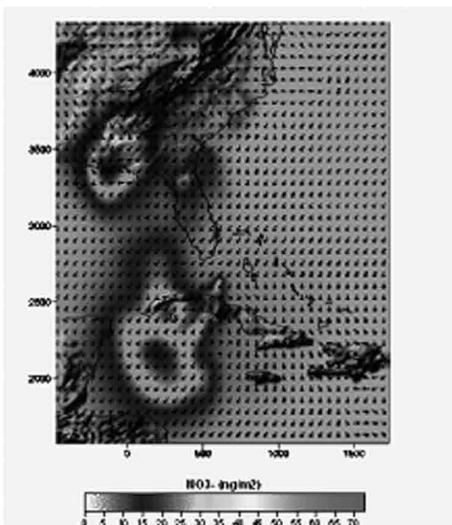


Fig. 3.11 Flujo diario promedio de los depósitos húmedos de nitrato asociados a las trayectorias inversas de masas de aire para el período poco lluvioso (2007).

das en el período lluvioso, es importante señalar que en su distribución espacial, en el caso del evento individual del 21 de abril, se observa una mayor contribución de las fuentes externas, como puede apreciarse en el mapa de trayectorias inversas, y aparecen las mayores tasas de deposición húmeda de nitrato que afectan la costa norte occidental de Cuba, así como que existe una contribución antropogénica local al proceso de acidez sobre el territorio nacional (López, 2007).

Por su parte, se relacionó la distribución espacial diaria del depósito húmedo del nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) obtenido de la ejecución del módulo CALPUFF con las trayectorias de las masas de aire calculadas por el HYSPLIT\_4, provenientes de fuentes externas en el período lluvioso (mayo-octubre) (Fig. 3.12). Para el evento del día 15 de mayo y la deposición húmeda de nitrato, se demostró que las mayores tasas son las zonas con emisiones antropogénicas locales de precursores de la acidez (tramo costero Mariel-Varadero).



NOAA HYSPLIT MODEL  
Backward trajectories ending at 0000 UTC 15 May 07  
GDAS Meteorological Data

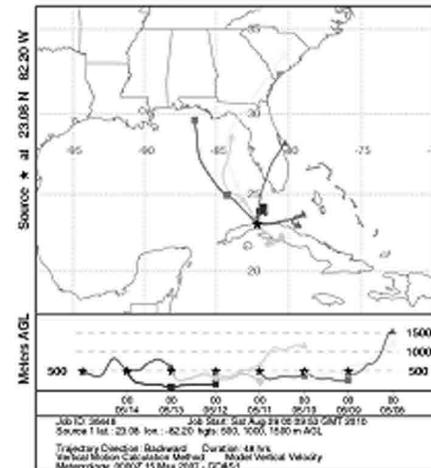


Fig. 3.12 Flujo diario promedio de los depósitos húmedos de nitrato asociados con las trayectorias inversas de masas de aire para el período poco lluvioso (2007).

### Formación de ozono troposférico

La formación del ozono troposférico responde a patrones sinópticos que se asocian con cierta persistencia durante los meses seleccionados de una masa anticiclónica con centro en el continente y en el Golfo de México, que favorece su producción (Lapinel, 1989; Ramírez, 1989) y propicia la destrucción fotoquímica del NO<sub>2</sub>. Las trayectorias inversas asociadas se muestran en la figura 3.13, junto a los valores medios horarios de las concentraciones de ozono obtenidos a partir del modelo euleriano para febrero.

Para febrero, el valor máximo absoluto se alcanza a las 12 horas, con 28,1 ppb(v), asociados a las trayectorias de masas de aire provenientes del sureste de los Estados Unidos. Finalmente, las concentraciones de ozono obtenidas a partir del modelo simple se corresponden con los niveles de fondo global (Harris *et al.*, 1997) que se estarían produciendo dadas las limitaciones de la información de las emisiones utilizadas en el estudio.

### Conclusiones

Los resultados alcanzados a partir de la ejecución del modelo de trayectorias de masas de aire HYSPLIT\_4 demostraron que existe un predominio de las contribuciones provenientes de fuentes de emisiones transfronterizas en el período poco lluvioso (noviembre-abril), mientras que las mayores contribuciones desde fuentes de emisiones locales se producen durante el período lluvioso (mayo-octubre).

La relación entre las trayectorias inversas de masas de aire y los tipos de situaciones sinópticas permitió establecer un patrón típico para ambos períodos (poco lluvioso y lluvioso) que explican el transporte transfronterizo durante el período poco lluvioso con el predominio de los anticiclones migratorios, contrastante con el período lluvioso, donde existe un predominio de las zonas de convergencia con presencia de ondas y hondonadas que favorecen el incremento de las tasas de precipitación.

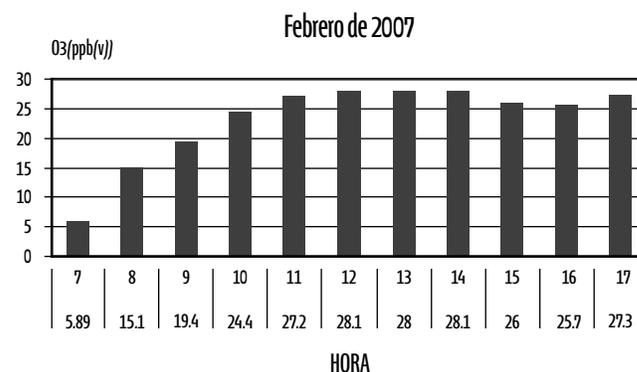
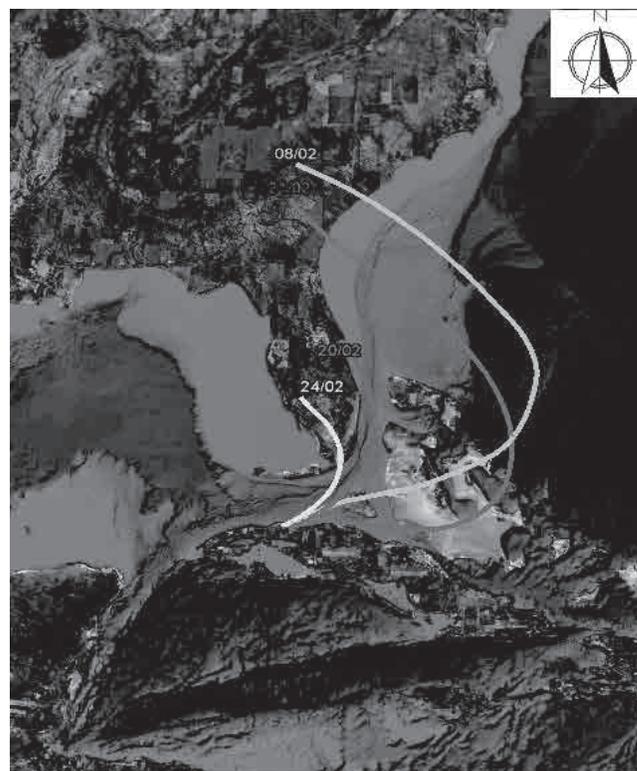


Figura 3.13 Comportamiento promedio horario mensual de las concentraciones de ozono, Casablanca, La Habana, Febrero/2007.

La aplicación del sistema de modelación CALMET /CALPUFF a escala regional verificó que los valores de las concentraciones de los precursores gaseosos NO<sub>x</sub> se corresponden con los niveles observados de fondo regional (López, 2007), y la deposición húmeda de nitrato verificó que las mayores tasas coinciden con zonas con emisiones antropogénicas locales de precursores de la acidez (tramo costero Mariel-Varadero). Por su parte, los valores de ozono troposférico calculados

a partir del modelo euleriano implementado constituyen un aporte al conocimiento de los niveles de concentración de ozono natural de fondo global (Harris *et al.*, 1997) que se estarían produciendo por la limitación del inventario de emisiones de fuentes utilizado.

## Bibliografía

- AHERNE, J., A. MONGEON Y S.A. WATMOUGH (2010): Temporal and spatial trends in precipitation chemistry in the Georgia Basin, British Columbia, *Journal of Limnology*, no. 69, pp.: 4-10.
- ALTSHULLER, A.P. Y A.S. LEFOHN (1996): Background ozone in the planetary boundary layer over the United States, *J. Air & Waste Manag. Assoc.* 46, pp.: 134-141.
- BORGE, R., J. LUMBRERAS, S. VARDOULAKIS, P. KASSOMENOS Y E. RODRIGUEZ (2007): Analysis of long-range transport influences on urban PM10 using two-stage atmospheric trajectory clusters, *Atmospheric Environment*, vol., no 21, pp.: 4434-4450.
- CUESTA, O. A., A. MAREN, Y A. WALLO (2009): Características principales de la contaminación atmosférica a nivel local y regional en Cuba, 2008, INSMET, La Habana
- DRAXLER, R., B. STANDER, G. ROLPH, A. F. STEIN Y A. TAYLOR (2009): HYSPLIT User's Guide version 4.
- HARRIS, N. R. P., G. ANCELLET, L. BISHOP, D. J. HOFFMANN, J. B. KERR, R. D. MCPETERS, M. PRÉNDEZ, W. J. RANDEL, J. STAEHELIN, B. H. SUBBARAYA, A. VOLZ-THOMAS, J. ZAWODNY Y C. S. ZEREFOS (1997): Trends in Stratospheric and free tropospheric ozone, *Journal of Geophysical Research*, 102(D1): pp.: 1571-1590.
- LAPINEL, B. (1989): Situaciones sinópticas predominantes sobre Cuba, Doctora en Ciencias Meteorológicas, Universidad de La Habana.
- LÓPEZ, C. M. (2007): Introducción a la Gestión de la Calidad del Aire, Vol. Cap. 4 y 5. CD-ROM. (Eds. DESOFT SA), Centro de Química y Contaminación Atmosférica, INSMET, La Habana, Cuba.
- LÓPEZ, C. M., R. MANSO, A. VALDÉS, A. LEÓN, V. GUEVARA, C. GONZÁLEZ, G. LEGAÑO, T. M. GONZÁLEZ, J. DÁVALOS, M. E. GARCÍA, R. BIART, I. LÓPEZ, D. PÉREZ *et al.* (2009): Emisiones y Remociones de Gases de Invernadero en Cuba: Reporte actualizado para el período 1990-2004, INSMET, La Habana, Cuba
- MADRONICH, S. (1987): Photodissociation in the Atmosphere 1. Actinic Flux and the Effects of Ground Reflections and Clouds, *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 92(D8):11.
- MORALES, R. (2006): Contaminación atmosférica urbana. Episodios críticos de contaminación ambiental en la ciudad de Santiago. Editorial Universitaria, S.A., Santiago de Chile, pp.: 327.
- RAMÍREZ, J. (1989): "Estudio de las variaciones en las concentraciones de ozono troposférico en Cuba y su vinculación con algunos fenómenos meteorológicos, Doctora en Ciencias Geográficas", Universidad de La Habana.
- SCIRE, J. S., F. R. ROBE, R. J. YAMARTINO Y M. E. FERNAU (2000a), A User's Guide for the CALMET meteorological model (version 5.0), Earth Tech, Inc. (Concord, MA), EE. UU., p.: 332.
- SCIRE, J. S. 2000b, A User's Guide for the CALPUFF Dispersion Model (version 5.0), Earth Tech, Inc., Concord, MA. Earth Tech, Inc (Concord, MA), EE. UU., p. 521.
- SEINFELD, J.H. AND S.N. PANDIS (2006): Atmospheric and Physics from Air Pollution Climate Change, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, p. 1249.
- TURTÓS, L., E. MENESES, M. SÁNCHEZ, J. RIVERO Y N. RIVERO (2007): Assessment of the impacts on health due to the emissions of Cuban power plants that use fossil fuel oils with high content of sulfur. Estimation of external costs, *Atmospheric Environment*, vol. 41, no. 2, pp.: 2202-2213.
- US. NATIONAL EMISSION INVENTORY. US. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, (Eds US. EPA), *Air*

*Emission Sources*. consultado: 22 julio 2009, <http://www.epa.gov/air/emissions/where.htm>.

WHO, 2005, WHO/SDE/PHE/OEH/06.02: Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide, Global Update 2005, Summary of risk assessment, consultado: [http://www.euro.who.int/\\_data/assets/pdf\\_file/0005/78638/E90038.pdf](http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0005/78638/E90038.pdf).

## **Agradecimientos**

A los profesores doctor Raúl Morales, doctor Luis Morales Salinas, doctor Manuel Leiva, y demás profesores y auxiliares del Departamento de Recursos Naturales Renovables de la Facultad de Ciencias Agronómicas y Forestales, y del Laboratorio de Química Ambiental de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile, por su apoyo para la realización de este trabajo. Asimismo, a los funcionarios de la Agencia de Colaboración Internacional (AGCI) del Ministerio de Relaciones Exteriores del gobierno de la República de Chile, por brindarme el financiamiento como becario durante mi estancia en ese país.