



UNIVERSIDAD DE CHILE
Programa Interfacultades
Magíster en Gestión y Planificación Ambiental

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN:
GESTIÓN Y PLANIFICACIÓN AMBIENTAL**

**ANÁLISIS DE LA CONTAMINACIÓN TRANSFRONTERIZA Y LOCAL
DE CONTAMINANTES GASEOSOS PRECURSORES DE LA
DEPOSITACIÓN ÁCIDA HÚMEDA Y FORMACIÓN DE OZONO EN
CUBA.**

ARNALDO EVARISTO COLLAZO ARANDA

SANTIAGO DE CHILE

2011

“Produce una inmensa tristeza pensar que la naturaleza habla mientras el género humano no la escucha...”

Victor Hugo

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que incondicionalmente me brindaron su apoyo de una forma u otra en la realización de esta tesis.

A mi madre, por ser la luz, la fuerza, el deseo y el alma de este corazón sin fronteras.

A la memoria de mi querida e inolvidable abuela Eugenia por ser parte inseparable de mi vida

A mi padre, por ser la raíz de mi pasión por las ciencias Naturales y por el apoyo que me ha dado siempre que me propongo hacer algo.

A mi esposa Niurka e hijos: Amanda y Daniel porque son las fuerzas que me impulsan a vivir cada día

A mi tutores Raúl Morales y Luis Morales, por ser mis amigos, mis compañeros y mis maestros en todas las situaciones y momentos.

A mi hermana chilena Marcela y su Familia, por considerarme como un miembro más de su familia y por brindarme todo su cariño, afecto, respeto y apoyo durante mi estancia en Chile y que sin ellos hubiese sido muy difícil llegar al término de esta tesis

A mis Hermanos Martica y Rubén por su apoyo y entrega incondicionales en el cuidado de mis hijos durante estos tres años fuera de Cuba

A mi jefe Oswaldo Cuesta y todos los colegas del Centro de Química Atmosférica por ser mi otra gran familia. A Tomás Gutiérrez, el Director de Directores y a sus profesionales y técnicos del Servicio Meteorológico Cubano por su apoyo y colaboración permanente.

A todos mis profesores y colegas del curso de magíster en Gestión y Planificación Ambiental de la Universidad de Chile por su apoyo, colaboración y entrega en todo momento.

A la Secretaria del Magíster en Gestión y Planificación Ambiental, Catalina Garay por toda su colaboración y ayuda

A los profesores, auxiliares y secretarías del Departamento de Recursos Naturales Renovables de la Facultad de Ciencias Agronómicas y del Laboratorio de Química Ambiental de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile por todo su ayuda moral y profesional, dedicación y entrega para la realización de esta tesis.

A las especialistas Irma, Dayana, Gloria de la biblioteca de la Facultad de Ciencias Agronómicas por sus atenciones, colaboración y ayuda en cada momento.

A la Directora Dra. Cristina Lazo y a sus funcionarios de la Agencia de Colaboración Internacional del Gobierno de la República de Chile que me atendieron y apoyaron durante estos tres años.

A mis amigos chilenos: Geraldine, Hugo, Roberto, Cristian Echeverría, Cristian Bustos, Marisol, Francisco, María José, Esteban, Fidel, Fernando, Lorenzo, Carolina y a sus queridas familias por todo su cariño, apoyo y preocupación en cada momento.

A mis doctoras Nicole, Josefina, Rocío y Marcela por su gran atención y apoyo.

Agradecimientos especiales a los profesores y profesoras: Margarita Préndez, Laura Gallardo, Jesús Centeno, Richard Toro, Manuel Leiva, Patricio Jara, Marcelo Mena, Patricio Pérez, Roberto Rondanelli, Hector Forquera, Eduardo Menéndez y

Ana María Córdova por su colaboración, recomendaciones y consejos para la realización de esta tesis

A mis amigos Juan Espinosa y Sylvia por todas sus atenciones, preocupaciones y muestras de cariño y afecto.

A mi amigas Cecilia y Ximena por todo su cariño, atención, preocupación y colaboración.

A las funcionarias Lucia y Araceli del Departamento de Colaboración Internacional del Ministerio Cubano de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente por toda su colaboración y ayuda.

A las funcionarias María Elena y Baby de la Agencia Cubana del Medio Ambiente

A mis amigos del Servicio Meteorológico e Hidrológico de Suecia: Lars, Inger y Camila por sus conocimientos, experiencias y colaboración

A los funcionarios de la embajada de Cuba en Chile

Por último, deseo expresar mis más profundos y sinceros agradecimientos a la colaboración internacional entre los Gobiernos de las Repúblicas de Chile y Cuba

A todos muchas gracias

ÍNDICE DE CONTENIDOS

<i>RESUMEN</i>	11
<i>ABSTRACT</i>	12
1. INTRODUCCIÓN	14
2.1 Hipótesis	16
2.2 Objetivo General.....	16
2.3 Objetivos específicos	16
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO	17
1.1 Las emisiones de los óxidos de nitrógeno y sus efectos sobre la calidad del aire.....	20
1.2 Modelo para el cálculo de las trayectorias inversas de masas de aire	24
1.3 Clasificación de los Tipos de Situaciones Sinópticas para Cuba	26
1.4 Modelación del transporte y difusión regional de contaminantes atmosféricos.....	31
1.5 Formación de ozono troposférico	43
CAPITULO 2. MATERIALES Y MÉTODO	44
2.1 Dominio del estudio.....	45
2.2 Base de datos meteorológicos globales.....	45
2.3 Procesamiento de las imágenes NNR.....	45
2.4. Caracterización climática para la estación meteorológica Casablanca en el período del estudio.	47
2.5. Identificación de la distribución espacial de las emisiones provenientes de fuentes de combustión estacionarias locales y externas.	50
2.5.1 Inventario de emisiones para fuentes de combustión estacionarias locales.	50
2.5.2 Inventario de emisiones para fuentes de combustión estacionarias externas	51
2.6 Caracterización de la distribución espacial de los patrones meteorológicos en los periodos poco lluvioso y lluvioso asociados a las contribuciones desde fuentes de combustión estacionarias locales y externas	53
2.7 Caracterización del comportamiento de los flujos de concentraciones del contaminante (NO _x), y de la depositación ácida húmeda del nitrato (NO ₃ ⁻).	55
2.7.1 Generalidades del sistema CALMET/CALPUFF/CALPOST	55
2.8 Formación de ozono troposférico	58
2.8.1 Principios básicos.....	58
2.8.2 Los diversos factores que gobiernan la química troposférica	60
2.8.1 Algoritmo para calcular las concentraciones de ozono troposférico	61
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	63
3.1 Distribución espacial de las emisiones provenientes de fuentes locales y externas	63
3.2 Análisis de las trayectorias inversas	64
3.2.1 Simulaciones con el modelo de trayectorias HYSPLIT versión 4.	64

3.3 Resultados de la Modelación del transporte y depositación de los contaminantes atmosféricos	69
3.3.1 Comportamiento de las concentraciones de NO _x obtenidos por el modelo CALPUFF	69
3.3.2 Comportamiento de la distribución espacial y temporal de la depositación ácida húmeda del Nitrato a partir de las salidas de CALPUFF	73
3.4 Formación de ozono troposférico	76
CONCLUSIONES	84
RECOMENDACIONES	85
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86
ANEXOS Anexo 1. Diagrama Metodológico del estudio	93
Anexo 2. Localización de las fuentes emisiones atmosféricas de NO_x y SO₂ en la parte Sudeste de los Estados Unidos.	94
Anexo 3. Distribución espacial de las emisiones de NO_x y SO₂ provenientes de las fuentes externas (Sudeste de los Estados Unidos) 2007.	100
Anexo 4. Catálogo de las Trayectorias regresivas (o inversas) de masas de aire en el año 2007, calculadas mediante el modelo HYSPLIT versión 4.	101
Anexo 5. Diagrama de flujo del funcionamiento del modelo CALMET	104
Anexo 6. Catálogo de Rosas de los Vientos Mensuales para la estación meteorológica de superficie, Casablanca en el año 2007, calculadas mediante el utilitario CALWindRose versión 4.8 del sistema de modelación CALPro.	105
Anexo 7. Condiciones meteorológicas favorables para la formación de ozono troposférico en Casablanca, La Habana.	106
Anexo 8. Gráficos del Flujo actínico horario para cada día seleccionado y la constante de fotólisis J.	107
Anexo 9. Funciones de ajuste de los valores de sección de eficaz y rendimiento cuántico para el cálculo de la constante de fotólisis de la molécula de NO₂.	108
Anexo 10. Prueba de sensibilidad en los cambios de las tasas de emisión de NO_x a partir del modelo CALPUFF/CALPOST	109

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1.1</i>	<i>Escalas de los problemas de contaminación del aire.....</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 2.5.1</i>	<i>Localización de las fuentes locales de emisión.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 2.5.2</i>	<i>Características tecnológicas de las fuentes locales de emisión.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 2.5.3</i>	<i>Estados del Sureste de los Estados Unidos.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 2.5.4</i>	<i>Distribución de frecuencia de las fuentes de emisión en el dominio del estudio.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 2.5.5</i>	<i>Distribución de los puntos de emisión en el dominio del estudio.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 2.5.6</i>	<i>Fuentes de emisión y sus características tecnológicas.....</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 2.6.1</i>	<i>Los parámetros y propiedades utilizados para la ejecución del modelo HYSPLIT_4.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 2.8.1</i>	<i>Reacciones fotolíticas asociadas a rangos de longitudes de onda.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 3.4.1</i>	<i>Emisiones de NOx a partir de las CTE en Cuba.....</i>	<i>76</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Ubicación de las estaciones de monitoreo de la contaminación atmosférica en Cuba. Fuente: Instituto de Meteorología de Cuba, 2004.....	17
Figura 1.2. Valores de pH en la lluvia mensual de las estaciones con promedio anual. Fuente: Instituto de Meteorología de Cuba, 2004.....	18
Figura 1.3 Valores de pH anuales (1995-2004). Fuente: Instituto de Meteorología de Cuba, 2004.....	19
Figura 1.4 Marcha Anual histórica de las concentraciones de Ozono Troposférico. Fuente: Elaboración propia en base a Ramírez (1989).....	20
Figura 1.3.1. Tipo de Situación Sinóptica Tipo I, Anticiclón del Atlántico. Fuente: INSMET, 2007.....	27
Figura 1.3.2 Tipo de Situación Sinóptica Tipo II, Anticiclón Extendido. Fuente: INSMET, 2007.....	27
Figura 1.3.3 Tipo de Situación Sinóptica Tipo III, Gradiente débil. Fuente: INSMET, 2007.....	28
Figura 1.3.4 Tipo de Situación Sinóptica Tipo IV, Situaciones ciclónicas. Fuente: INSMET, 2007.....	28
Figura 1.3.5 Tipo de Situación Sinóptica Tipo V, Zonas de convergencia. Fuente: INSMET, 2007.....	29
Figura 1.3.6 Tipo de Situación Sinóptica Tipo VI, Baja Extratropical. Fuente: INSMET, 2007.....	29
Figura 1.3.7 Tipo de Situación Sinóptica Tipo VII, Frente frío. Fuente: INSMET, 2007.....	30
Figura 1.3.8 Tipo de Situación Sinóptica Tipo VIII, Anticiclón migratorio. Fuente: INSMET, 2007.....	30
Figura 1.4.1. Modelo Digital de Elevación para el dominio del estudio.....	33
Figura 1.4.2 Configuración del Sistema de Modelación CALPro.....	34
Figura 1.4.3 Mecanismo químico que conduce a los procesos de depositación seca y húmeda. Fuente: Tomado de Trukenmuller, et al., (2001).....	40
Figura 1.5.1. Proceso de formación y destrucción del ozono troposférico. Fuente: Adaptado de (Sillman, 1999).....	43
Figura 1.5.2 Concentraciones medias de ozono para el año 2030. Datos producidos por el modelo global de ozono Fuente: Adaptado de STOCHEM, Collins et al., (2000).....	44
Figura 2.1 Dominio del Estudio.....	1
Figura 2.2. Visualización de los vectores de vientos promedios mensuales para los meses de Enero y Julio / 2007 en el dominio del estudio.....	46
Figura 2.3 Relación entre los valores observados y estimados por el método de interpolación segmentario o Spline. Casablanca, 26/05/2007.....	49
Figura 2.4 Gráfico de dispersión entre las series de la rapidez del viento simulada y observada para la estación meteorológica de superficie Casablanca.....	49
Figura 3.1.1. Distribución de las emisiones de NO _x provenientes de fuentes locales, CTE, Cuba.....	63
Figura 3.1.2. Distribución de las emisiones de SO ₂ proveniente de las fuentes locales, CTE, Cuba.....	64
Figura 3.2.1 Distribución de Frecuencia de las trayectorias inversas de las masas de aire. Casablanca, La Habana, 2007.....	65
Figura 3.2.2 Distribución de Frecuencia de las trayectorias inversas de las masas de aire. Casablanca, La Habana, 2007.....	66
Figura 3.2.3 Distribución de Frecuencia de las trayectorias inversas de las masas de aire. Casablanca, La Habana, 2007.....	66
Figura 3.2.4. Relación entre TSS y las trayectorias de masas de aire. Casablanca. Periodo Lluvioso/ 2007.....	67
Figura 3.2.5. TSS predominante para los meses de Mayo y Julio. Periodo Lluvioso/ 2007.....	67
Figura 3.2.6 Relación entre TSS y las trayectorias de masas de aire. Casablanca. Periodo Poco Lluvioso/ 2007.	68
Figura 3.2.7. TSS predominante para los meses de Enero y Febrero. Periodo Poco Lluvioso/ 2007. Fuente: INSMET, 2007.....	69
Figura 3.3.1.1 Comportamiento promedio horario mensual de las concentraciones de NO _x en la localidad de Falla, para el periodo Poco Lluvioso de 2007.....	70
Figura 3.3.1.2 Comportamiento promedio horario mensual de las concentraciones de NO _x en la localidad de Falla, para el periodo Lluvioso de 2007.....	70
Figura 3.3.1.3 Comportamiento promedio horario mensual de las concentraciones de NO _x en la localidad de Falla, 2007.....	71
Figura 3.3.1.4 Comportamiento promedio horario mensual de las concentraciones de NO _x en la localidad de Falla, 2007. Corregida para el periodo lluvioso.....	72
Figura 3.3.2.1 Flujo diario promedio de los depósitos húmedos de nitrato asociado a las trayectorias inversas de masas de aire para el periodo poco lluvioso. Fuente: Elaboración propia a partir de Draxler et al. (2009).....	74

<i>Figura 3.3.2.2. Flujo diario promedio del depósito húmedo de nitrato asociado a las trayectorias inversas de masas de aire para el periodo lluvioso. Fuente: Elaboración propia a partir de Draxler et al. (2009).....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 3.4.1. Comportamiento promedio horario mensual de las concentraciones de ozono, Casablanca, La Habana, Febrero/2007.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 3.4.2. Comportamiento promedio horario mensual de las concentraciones de ozono, Casablanca, La Habana, Abril/2007.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 3.4.3. Comportamiento promedio horario mensual de las concentraciones de ozono, Casablanca, La Habana, Noviembre/2007.</i>	<i>79</i>
<i>Figura 3.4.4. Relación entre los valores promedio mensual de las concentraciones de ozono para un escenario crítico de emisiones de precursores, Casablanca, La Habana, Febrero/2007.</i>	<i>80</i>
<i>Figura 3.4.5. Relación entre los valores promedio mensual de las concentraciones de ozono para un escenario crítico de emisiones de precursores, Casablanca, La Habana, Abril/2007.</i>	<i>80</i>
<i>Figura 3.4.6. Relación entre los valores promedio mensual de las concentraciones de ozono para un escenario crítico de emisiones de precursores, Casablanca, La Habana, Noviembre/2007.</i>	<i>81</i>
<i>3.4.8. Comportamiento mensual de las componente u del viento para la localidad de Casablanca, La Habana, 2007.</i>	<i>81</i>
<i>3.4.9. Comportamiento mensual de las componente v del viento para la localidad de Casablanca, La Habana, 2007.</i>	<i>82</i>
<i>Figura 3.4.10. Anomalías relativas de las componentes u y v del viento entre el período histórico (1978-1989) y el año 2007 para la localidad de Casablanca, La Habana.....</i>	<i>82</i>

RESUMEN

El análisis de la contaminación transfronteriza y local de los compuestos precursores NO_x de la depositación ácida húmeda y formación de ozono en Cuba, permitió recopilar información sobre la distribución espacial de las emisiones de los compuestos gaseosos NO_x y SO_2 en el dominio de estudio, por lo que se realizó un inventario de emisiones de fuentes de combustión (termoeléctricas) locales y transfronterizas (Sudeste de los Estados Unidos).

Este estudio caracterizó los tipos de situaciones sinópticas en los periodos poco lluvioso y lluvioso del 2007 en asociación con las trayectorias inversas de masas de aire utilizando el modelo HYSPLIT_4, y que tienen incidencia en la distribución de las emisiones de los precursores gaseosos NO_x de origen local y transfronterizo. Por otra parte, la ejecución del modelo CALMET/CALPUFF permitió caracterizar las variaciones de las concentraciones de los compuestos precursores gaseosos NO_x y las tasas de depositación 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_x corresponden con los niveles observados de fondo regional (inferiores a $2\mu\text{g}/\text{m}^3$) y la depositación húmeda de nitrato ($30\text{-}90\text{ ng-NO}_3^-/\text{m}^2$) verificó 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 a partir del 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 limitaciones de la información pre-existente, los resultados alcanzados a partir de la modelación del transporte y las transformaciones químicas de los compuestos precursores NO_x a escala regional, permiten contar con una herramienta adecuada para la planificación y gestión de la calidad del aire en Cuba.

Palabras claves: acidificación, emisiones transfronterizas, ozono troposférico, modelación de transporte de gases, depositación húmeda ácida, HYSPLIT_4, CALMET/CALPUFF, modelo Euleriano

ABSTRACT

The local and transboundary air pollution analysis of precursor compounds NO_x of wet acid deposition and ozone formation in Cuba, allowed getting information on the spatial distribution of emissions of NO_x and SO_2 gaseous compound in the domain study, making an inventory of emissions from combustion sources (power plants) and local transfers (Southeast U.S.).

This study characterized synoptic situations classifying in the dry and rainy season of 2007 in relationship with the back trajectories of air masses using HYSPLIT_4 model, and that impact the distribution of gaseous precursor emissions from NO_x local and transboundary emission sources. Besides, the implementation of the model CALMET / CALPUFF allowed featuring the variations in the concentrations of gaseous precursor compounds NO_x and wet deposition of nitrate. Also, it was estimated the surface ozone concentration from the implementation of an Eulerian model.

The result discussion shows that the estimated values of nitrogen oxides NO_x correspond to the regional background levels (less than $2\mu\text{g}/\text{m}^3$) and wet deposition of nitrate ($30\text{-}90\text{ ng-NO}_3^-/\text{m}^2$) 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 NO_x at regional level have allowed an adequate tool for planning and management air quality in Cuba.

Keywords: acidification, transboundary emissions, surface ozone level, modeling of gas transport, acid wet deposition, HYSPLIT_4, CALMET / CALPUFF, Eulerian model

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, 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 (LRTAP, 2010; 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 que la necesidad de reducir la exposición a la contaminación continúa siendo un asunto pendiente, que por lo demás, 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 (Amann *et al.*, 1995; LRTAP, 2010; Aherne *et al.*, 2010).

En Cuba, desde hace ya algún tiempo, se ha venido observando un incremento en la frecuencia del fenómeno de las lluvias ácidas, según los estudios e investigaciones más recientes (López *et al.*, 1999), las que han encontrado 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, y es donde la modelación matemática es una valiosa herramienta que permite integrar y sintetizar el conocimiento para una mejor comprensión de los procesos atmosféricos, así como dar respuesta a diferentes interrogantes desde la gestión de la calidad del aire en el país.

La experiencia cubana en la modelación de la dispersión, transporte y 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.

Los estudios más recientes para evaluar la contribución proveniente de fuentes locales y regionales a los problemas de contaminación atmosférica en Cuba son los de Meneses y Turtós (2003). En ellos no se pudo establecer un comportamiento típico para la dispersión regional de contaminantes en el área aunque sí pudo comprobarse que aparecen patrones de comportamiento generales para cada contaminante.

Estos estudios tienen importancia ya que, por primera vez, en ellos se inventariaron, evaluaron e identificaron algunas de las fuentes de emisión local y regional. Sin embargo, la generalización de sus resultados se ha visto limitada porque ellos solamente tomaron en cuenta las mayores fuentes emisoras locales y regionales de la generación eléctrica. Por tal motivo, para llevar a cabo la presente investigación, fue necesario realizar un nuevo catastro de fuentes de emisión local y regional, así como la integración de la fenomenología meteorológica de escala sinóptica que afecta e impacta por transporte los contaminantes de zonas aledañas.

Por tales motivos, estos modelos de transporte, dispersión, transformaciones químicas y depositación de los contaminantes atmosféricos son importantes para los sistemas de gestión de la calidad del aire y ampliamente 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 para reducir las emisiones de los contaminantes dañinos. Por ejemplo, se pueden emplear durante un proceso de evaluación de impacto ambiental para verificar que una nueva fuente no excederá los estándares de Calidad del Aire Ambiental o, si es necesario, determinar requerimientos de control adicionales y reducir los impactos (Borge *et al.*, 2007). También los modelos pueden utilizarse para predecir futuras concentraciones a partir de las emisiones de contaminantes desde múltiples fuentes y para estimar la eficacia del programa en la reducción de las emisiones de contaminantes frente a la exposición dañina a los seres humanos y a los ecosistemas.

Por todo lo anteriormente planteado, el presente estudio tiene como propósito principal el análisis de la contaminación atmosférica transfronteriza y local de los contaminantes precursores: NO_x ($\text{NO}_2 + \text{NO}$) 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 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.

2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

2.1 Hipótesis

La distribución espacial y temporal de la deposición ácida húmeda, que se deriva de los precursores NO_x de origen local y transfronterizo, sigue un comportamiento dependiente de condiciones meteorológicas típicas, que son posibles de modelar. De igual modo, la distribución de ozono troposférico, en su forma más simple, sigue un patrón concordante con las emisiones.

2.2 Objetivo General

Analizar la contaminación atmosférica producto de las emisiones de fuentes locales y transfronterizas de los precursores gaseosos NO_x y su impacto en los procesos de deposición ácida húmeda y formación de ozono en Cuba.

2.3 Objetivos específicos

Analizar la distribución espacial de las emisiones de NO_x de origen local y transfronterizo en el dominio de estudio, comprendida entre los 14-39 grados de latitud Norte (N) y los 90-70 grados de longitud Oeste (W).

Caracterizar los tipos de situaciones sinópticas en los periodos poco lluvioso y lluvioso asociados al transporte de masas de aire, que tienen incidencia en la distribución de los precursores gaseosos NO_x de origen transfronterizo y local, tomándose como caso de estudio el año 2007.

Caracterizar los comportamientos que describen las variaciones de las concentraciones de los precursores gaseosos NO_x, que explican la distribución espacial y temporal de la deposición ácida húmeda y la formación de ozono troposférico en Cuba.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

Antecedente de la evaluación de la contaminación atmosférica a nivel regional en Cuba

En Cuba desde la década de los años 80 se observa una tendencia al aumento de la frecuencia de las lluvias ácidas (Rodríguez et al., 1992), situación que se acentuó entre 1989 y 1995, lo que representa el principal problema de la calidad de la atmósfera en el nivel regional. A partir de 1996 se ha producido una disminución de la acidez de la lluvia, proceso que no ha podido confirmarse con la calidad necesaria, dado el deterioro del actual sistema de monitoreo (AMA, 2004). Aún así, el comportamiento del pH de la lluvia se analiza a partir de muestras mensuales colectadas en la red de estaciones de monitoreo del Centro de Contaminación y Química de la Atmósfera (CECONT) del Instituto de Meteorología que forman parte del SINVCA (Figura 1.1).



Figura 1.1 Ubicación de las estaciones de monitoreo de la contaminación atmosférica en Cuba. Fuente: Instituto de Meteorología de Cuba, 2004.

Las precipitaciones en Cuba alcanzan un valor anual que oscila entre 600 y 3000 mm/año (ONE, 2006). Los meses más lluviosos son mayo y octubre mientras que los de menor precipitación son enero y febrero. El valor de pH que se utiliza como criterio de clasificación de lluvias ácidas es 5,6, valor que está determinado por el dióxido de carbono presente en la

atmósfera en combinación de gotas de agua formando el ácido carbónico, por lo tanto por debajo de 5,6 se considera lluvia ácida y por encima se considera básica (Seinfeld y Pandis, 2006). Sobre la base de este criterio, las estaciones más afectadas durante el año 2003 por el fenómeno de las lluvias ácidas fueron Pinares de Mayarí (4,4), Gran Piedra (4,9) y Contramaestre (5,4).

Debido al incremento en la frecuencia de ocurrencia de las precipitaciones ácidas en la zona del oriente de Cuba, se hace necesario el inicio de un estudio profundo en esta zona, a la cual se denominará “Triángulo Ácido”, por las consecuencias futuras que se puedan generar en los bosques, suelos etc. de dicha zona. La estación de monitoreo de Pinares de Mayarí que se encuentra en la parte sur de la provincia de Holguín, puede recibir la influencia de las emisiones de compuestos contaminantes de la atmósfera provenientes de la zona industrial del norte de la mencionada provincia, aunque a escala regional son múltiples los factores que inciden en la acidificación de la atmósfera. Para ello se requiere la realización de investigaciones en este sentido (Figura 1.2).

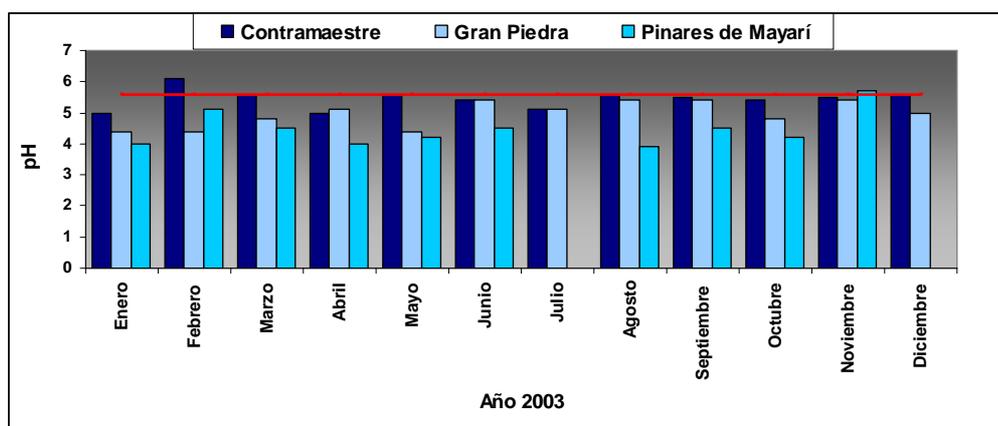


Figura 1.2. Valores de pH en la lluvia mensual de las estaciones con promedio anual. Fuente: Instituto de Meteorología de Cuba, 2004.

En la Figura 1.3, se muestran los valores de pH promedios anuales desde 1998 hasta el año 2003 en las estaciones: Pinares de Mayarí, Gran Piedra y Contramaestre, pudiéndose apreciar una tendencia en general al aumento de la acidez.

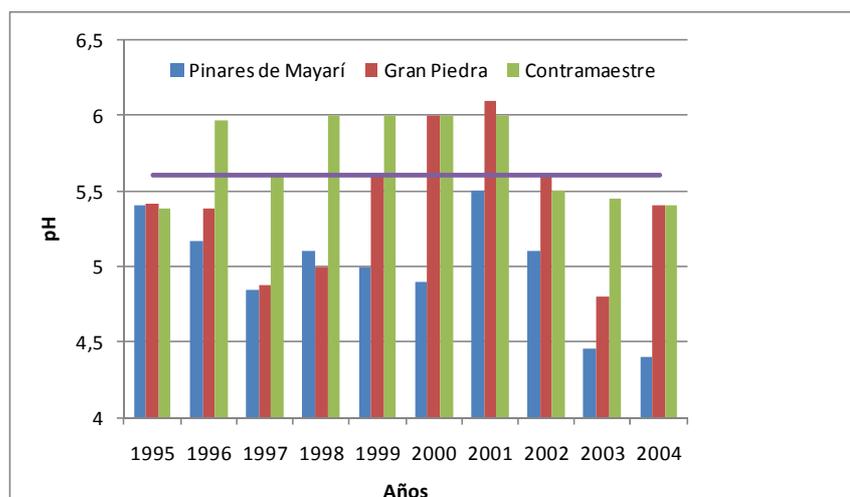


Figura 1.3 Valores de pH anuales (1995-2004). Fuente: Instituto de Meteorología de Cuba, 2004.

Por su parte, la estación Casablanca, la cual históricamente ha presentado valores de pH por debajo de 5,6 debido a que se encuentra influenciada por la cercanía de importantes fuentes de emisión de contaminantes, tales como la Refinería "Ñico López" y la Termoeléctrica de La Habana, está vez, registró un valor de pH promedio anual de 5,8.

En el año 2003, la estación Universidad (Santiago de Cuba) registró un valor de pH promedio anual de 5,6, que coincide con valor el límite que establece el criterio de acidez de lluvias "ácidas" siendo los meses de abril, mayo, agosto y diciembre los valores de pH promedio mensual inferiores a 5.6. Mientras que, Palo Seco es una estación rural, la cual ha sido informada como la más afectada por las lluvias ácidas en el periodo 1990 -1994 (López et al., 1999), registró un valor de pH promedio anual de 5,7.

El resto de las estaciones se encuentran ubicadas en entornos rurales, muy alejados de fuentes potentes locales de emisión de compuestos contaminantes de la atmósfera. En estas estaciones por lo general se presentan pH promedio anuales "básicos", e incluso superiores a 6 en algunos casos. Los valores de pH promedio anuales detectados en estas estaciones son los siguientes: Colón (6,5), Santiago de las Vegas (6,2), Falla (6,4), Guantánamo (5,9) y La Palma (6,3).

En Cuba la marcha histórica anual de las concentraciones de ozono superficial (O_3) presenta concentraciones promedio típicas de 15 ppb (v) para el período abril - septiembre y 60 ppb(v) durante los meses de octubre a marzo, período que coincide con el de óptimo desarrollo de los principales cultivos de país (Figura 1.4).

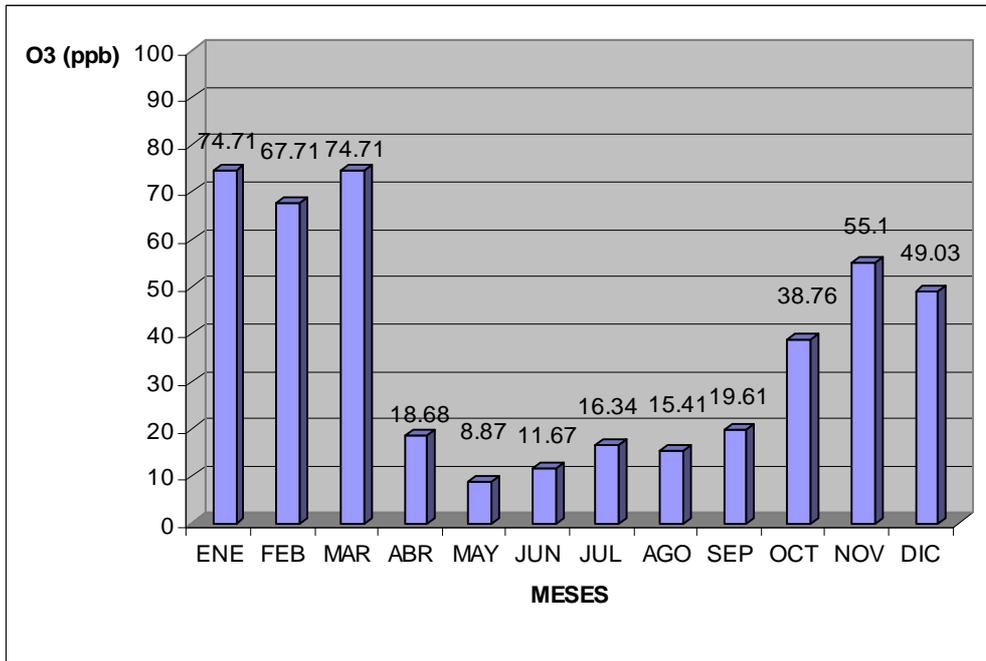


Figura 1.4 Marcha Anual histórica de las concentraciones de Ozono Troposférico. Fuente: Elaboración propia en base a Ramírez (1989).

1.1 Las emisiones de los óxidos de nitrógeno y sus efectos sobre la calidad del aire

El incremento de las emisiones de los óxidos de nitrógeno en la atmósfera y su consecuente transporte a largas distancias y posterior depositación, es un problema persistente en Europa y otras partes del mundo (Sogn y Abrahamsen, 1998). En particular, las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) y sus derivados producen impactos directos sobre la salud humana, los materiales, estructuras de las edificaciones y limitan la visibilidad (Cowling et al., 2002); y éstos impactos pueden sentirse alejados de la fuente de emisión de los óxidos de nitrógeno, los cuales pueden viajar grandes distancias, y al reaccionar fotoquímicamente (en presencia de luz solar) con los compuestos orgánicos volátiles contribuyen a la formación de ozono (Bytnerowicz *et al.*, 2010).

Las fuentes antropogénicas de los óxidos de nitrógeno (NO_x) están asociados a los procesos de combustión a altas temperaturas, tales como: termoeléctricas, refinerías de petróleo, el transporte automotor, así como el consumo doméstico de combustible (residencial).

El efecto natural sobre el transporte, dispersión, transformación y remoción de los contaminantes en una región, es un proceso complejo debido a los múltiples factores que influyen,

como son las variables meteorológicas, rapidez y dirección del viento, temperatura, humedad relativa y radiación solar y el efecto de las diferentes masas de aire que se diferencian por su origen y trayectorias y por lo tanto la distribución de gases y aerosoles, van a depender de todos estos factores.

Por su parte, una gran proporción del nitrógeno atmosférico ingresa en forma de nitrógeno inorgánico, principalmente nitrato (NO_3^-) y amonio (NH_4^+). El amonio se forma a través de reacciones atmosféricas que involucran a los óxidos de nitrógeno NO_x y sus fuentes de emisión que incluyen la quema de combustibles fósiles, las fuentes móviles, la industria, la quema de biomasa, y otros procesos naturales. La formación del amonio es principalmente por las reacciones de conversión de gas - partícula del amoniaco en la atmósfera. Por su parte, el amoniaco es principalmente un derivado de los residuos agrícolas, los fertilizantes, las emisiones industriales y la descomposición de sustancias orgánicas (Ayars y Gao, 2007; Seinfeld y Pandis, 2006).

La contaminación atmosférica es en primer lugar, un problema local, sin embargo la atmósfera arrastra las impurezas alejadas de las fuentes que la originan. Los contaminantes a medida que son transportados se diluyen y con el tiempo gran parte de ellos son barridos de la atmósfera por las precipitaciones y absorbidos por el suelo. Estos procesos de auto limpieza, (en los cuales tienen un gran peso la depositación seca) que a veces causan acumulaciones excesivas de contaminantes en otros medios (vegetación, suelo, aguas superficiales), pueden producirse lejos de las fuentes de emisión.

Hay que decir que en esta especialidad se presentan no pocos problemas en el manejo de los términos “escala” (de movimientos atmosféricos, de problemas de contaminación), “niveles de contaminación” etc., y en ocasiones se intercambian como si fueran equivalentes. En realidad no son equivalentes, aunque de forma aproximada se pueden plantear un ordenamiento como el que se muestra en la tabla 1.1 y donde, para algunos de los casos, las fronteras espaciales y temporales no puedan establecerse con precisión y continuidad absoluta (López, 2007).

Tabla 1.1 Escalas de los problemas de contaminación del aire.

Problema de Contaminación	Resolución Espacial (km)	Escala Temporal	Escala Meteorológica	Nivel de Contaminación (1)
Local	Menor que 1	Menor de 1h	Micro	Local
Urbano	1 - 20	Horas - Día	Micro – Meso	Local/Urbano
Regional Nacional	20 - 500	Horas - Días	Meso	Regional
Regional Continental	500 -3000	Días - Meses	Macro Inferior	Regional
Mundial	Mayor que 3000	Años	Macro	Global

Al nivel local se le denomina también “nivel de impacto”, mientras que a los niveles regional y global se les denomina “niveles de fondo”. Fuente: López (2007).

En el nivel regional, identificado en parte con el medio rural, nos encontramos con una disminución significativa en los niveles de concentración de los contaminantes en relación con los valores característicos del nivel local/urbano, identificado con los centros urbanos e industriales. También se observa en el nivel regional una disminución en la variedad de los elementos contaminantes presentes en el aire. Problemas característicos de este nivel son la acidificación de la lluvia (producida en buena medida por las emisiones a la atmósfera de compuestos de azufre y nitrógeno), el incremento de las concentraciones de ozono troposférico, la depositación de tóxicos y otros (López, 2007).

Uno de los problemas más graves que actualmente está tratando la Organización Meteorológica Mundial (*World Meteorological Organization*, WMO, siglas en inglés), es lo relacionado a la emisión de gases de larga duración, que cambian la composición de la atmósfera, el transporte, el ciclo de contaminantes y otras materias peligrosas a través de la atmósfera y las consecuencias que estos contaminantes pueden tener sobre el medio ambiente y el clima de la tierra (WMO, 2009; Cowling *et al.*, 2002).

Dentro de las investigaciones más importantes que se realizan en los centros de investigación sobre contaminación y medio ambiente, se encuentra el estudio y análisis de las concentraciones excesivas del nitrógeno y sus compuestos en nuestro planeta, y la relación con otros fenómenos y procesos de origen natural o antropogénico. La variación diaria de las concentraciones y depositaciones de contaminantes en zonas urbanas y rurales, son el resultado del desequilibrio entre los índices de producción de contaminantes (fuentes naturales y antropogénicas) y los de su dilución y desaparición por varios procesos que incluyen su difusión (transporte y dilución), reacciones químicas de transformación, absorción por el suelo, la vegetación y la limpieza por precipitaciones (Chou *et al.*, 2008). Uno de los elementos que

experimenta todos estos procesos antes mencionados durante el desarrollo de todo su ciclo de permanencia en el medio natural es el Nitrógeno (Baisre, 2006).

El nitrógeno molecular (N_2) es un gas incoloro e inodoro que se produce de forma natural en el medio ambiente. Es el elemento más abundante en la atmósfera como molécula, solo después es convertido a sus formas reactivas como el amonio (NH_4^+) y el nitrato (NO_3^-) utilizando como vía de transformación las plantas y los microbios (Galloway *et al.*, 2003). La mayor parte del nitrógeno existente a nivel mundial forma parte de la tierra sólida, dentro de la estructura química de rocas, tierra y sedimento. El resto se mueve en un ciclo dinámico entre la atmósfera, océanos, lagos, corrientes, plantas y animales. Pequeñas cantidades del nitrógeno presente en suelos y sedimentos también forman parte de este ciclo complejo.

La remoción seca y húmeda de los compuestos de nitrógeno depende de muchos factores como el clima y las características de las superficies; por ejemplo, en las áreas tropicales húmedas donde las lluvias intensas son de mucha frecuencia, la remoción húmeda es relativamente más importante que la seca, en cambio para las áreas desérticas de poca lluvia la remoción húmeda es insignificante (Baumgardner *et al.*, 2002; Mizak *et al.*, 2005; Trebs *et al.*, 2006).

Por su parte, de estudios anteriores existen evidencia a partir de los resultados de la remoción de los nitratos en la lluvia, que las fuentes de NO_x en los trópicos son menos intensas que las de los combustibles fósiles en las latitudes medias; definiéndose como las fuentes principales la quema de biomasa, la actividad biológica de los suelos y las descargas eléctricas (Logan, 1983; Hayashi *et al.*, 2006 ; Kajino *et al.*, 2008).

Las mediciones de dióxido de nitrógeno existentes en áreas rurales muestran valores medios en superficie desde 0,3 a 20,3 $\mu g/m^3$ en los Estados Unidos (Leiming *et al.*, 2008) y se aprecia que las mayores concentraciones se producen en las localidades más cercanas a las ciudades (Winston *et al.*, 2010). Resultados similares para Inglaterra y Japón fueron obtenidos en zonas rurales (Lynette y Jenkin, 2001). En Suecia para zonas alejadas de fuentes contaminantes las concentraciones oscilan entre 1,3 y 6,8 $\mu g/m^3$ (Hinrichsen, 1988).

Globalmente las concentraciones de amoniaco varían estacionalmente durante todo el año, y estas variaciones están asociadas principalmente a las condiciones climáticas y a las actividades agrícolas; además su depositación en los diferentes lugares del planeta contribuye a la acidificación de las aguas superficiales y los suelos. Este compuesto es una fuente importante de dióxido de nitrógeno (NO_2) en los trópicos, pues los arrozales (grandes emisores de amoniaco

(NH₃) son cultivos propios de estas latitudes y aproximadamente el 40% de la población mundial tiene como alimento básico a este cereal (Sutton *et al.*, 2001). Es conocido que la actividad biogénica de los microorganismos presentes en los suelos es la principal fuente de amoníaco (NH₃) y óxido nítrico (NO) a nivel mundial (Leiming *et al.*, 2008).

El ciclo del nitrógeno atmosférico en los trópicos nos muestra que el monóxido de nitrógeno (NO) y el amoníaco (NH₃) (que son convertidos rápidamente a dióxido de nitrógeno (NO₂)) son los principales gases emitidos a la atmósfera y luego son removidos por deposición seca y por las precipitaciones como nitrato y amonio (Trebs *et al.*, 2006).

1.2 Modelo para el cálculo de las trayectorias inversas de masas de aire

Los modelos de calidad del aire son una herramienta ampliamente utilizada para estudiar las relaciones fuente-receptor (Collett y Dyuyemi, 1997; Zannetti, 2004), entre ellos, el modelo HYSPLIT (Draxler *et al.*, 2009) es un sistema completo que es diseñado para apoyar un amplio rango de simulaciones relacionadas al transporte, dispersión de los contaminantes atmosféricos de circulación atmosférica a diversa escalas: local, meso escala, sinóptica, hemisférica, planetaria y también por su interacción con los procesos de remoción y además puede calcular las trayectorias de masas de aire desde una región fuente a otra, y de este modo demostrar, si en realidad el vector para el transporte de contaminación atmosférica está presente.

El análisis de las trayectorias regresivas (inversas) de masas de aire es una herramienta comúnmente utilizada en las investigaciones de calidad del aire (Davies *et al.*, 1990; Deininger y Saxena, 1997; Menon y Saxena, 1998; Buchanan *et al.*, 2002; Hondula *et al.*, 2010). Los métodos basados en trayectorias a menudo intentan identificar regiones fuentes de contaminantes atmosféricos estimando los recorridos de las masas de aire que arriban a la región de interés.

El modelo para el cálculo de trayectoria HYSPLIT ha sido utilizado en diferentes estudios de calidad del aire en diversas partes del mundo (Anastassopoulos *et al.*, 2004). Además la modelación HYSPLIT de trayectorias inversas (regresivas) brindan resultados de muy buena calidad con una resolución temporal de hasta 6 días por semana.

Las salidas del modelo HYSPLIT pueden variar desde trayectorias simples de parcela de aire hasta las simulaciones complejas de dispersión y depositación (NOAA, 1999). El HYSPLIT calcula la advección y dispersión utilizando enfoques de bocanadas *puff* o partículas bajo una plataforma lagrangiana (Draxler y Hess, 1997). El transporte y dispersión de un contaminante se

calculan asumiendo una emisión de una bocanada aislada con una distribución particular o la emisión de un número de partículas dispersas.

Según Hondula *et al.*, (2010), la climatología de la calidad del aire a escala sinóptica, a menudo puede ser analizada por la clasificación de situaciones sinópticas y/o por las trayectorias de masas de aire en 72 horas, de modo que, el análisis de las trayectorias inversas permite identificar las regiones geográficas fuentes de diversos compuestos atmosféricos. La precisión del análisis de las trayectorias es altamente dependiente de los datos de viento, los métodos de cálculos y las características de la meteorología asociada (Draxler y Hess, 1998; Stohl *et al.*, 2001). Aunque las trayectorias son a menudo precisas, pueden ocurrir hasta un 20% de errores de posición (Stohl, 1998). Sin embargo, el análisis de las trayectorias es una herramienta científica fundamental para la evaluación de los patrones de flujos atmosféricos.

Aunque las trayectorias inversas son aplicadas comúnmente en estudios de caso y de corto plazo para describir eventos de las últimas horas o días, las trayectorias han sido también utilizadas para caracterizar patrones climáticos cuando son compiladas múltiples estaciones y años. El enfoque más simple permite separar las trayectorias, definidas geográficamente, en base a la dirección de la brújula (Miller, 1981b; Miller *et al.*, 1993; Katsoulis, 1999) desde sus regiones fuentes (Miller, 1981a; Deininger y Saxena, 1997; Schichtel y Husar, 2001).

El cálculo de las trayectorias se alcanza por la integración temporal de la posición de una porción (o parcela) de aire logrado ya que es transportada por el viento tridimensional (Draxler y Hess, 1997).

Al movimiento regresivo en el tiempo, la trayectoria regresiva resultante indica qué la masa de aire llega al receptor en determinado momento, lo que identifica la región fuente. El modelo HYSPLIT ha sido utilizado en numerosas aplicaciones de calidad del aire (Poissant, 1999; Hsu *et al.*, 2003). Como la mayoría de los modelos de la contaminación del aire, el uso de HYSPLIT conlleva operaciones que requieren mucho tiempo y recursos, porque la modelación de la contaminación atmosférica sigue siendo una combinación de esfuerzo del operador humano (por ejemplo, la instalación y entrada manual del modelo) y el procesamiento computacional.

En particular, el análisis gráfico de la trayectoria generada por el módulo trayectoria de HYSPLIT_4 es típicamente una operación manual. Por tanto, es de interés investigar la resolución de modelos (es decir, el número de corridas del modelo) que se requiere para lograr resultados

satisfactorios estadísticamente significativos, ya que un modelo de resolución más baja (es decir, menos corridas) se traduce directamente en ahorro potencial de tiempo y dinero.

En los últimos años las constantes emisiones de contaminantes han provocado cambios en la composición química de la atmósfera, por lo que se hace necesario el análisis de algunos compuestos que tienen una gran dependencia del comportamiento de fenómenos meteorológicos y sus características.

Muchos de los autores han relacionado los patrones sinópticos con la contaminación atmosférica a escala local y regional, para poder conocer el comportamiento de los diversos compuestos según las características de estos patrones sinópticos (Cuesta, 1995; Cuesta *et al.*, 2000; Cuesta *et al.*, 2008), ya que su origen, lugar de desplazamiento y procesos internos (precipitación, descargas eléctricas, características de la radiación y otras) van a provocar también un clima químico que va a ser de interés para el estudio presente y futuro del medio ambiente.

1.3 Clasificación de los Tipos de Situaciones Sinópticas para Cuba

Según la clasificación climática de Köppen, (Jansá, 1974) el clima de Cuba pertenece a un clima del tipo Aw (clima tropical de sabana), que se caracteriza por un clima tropical alternativo con verano lluvioso e invierno seco. Esto hace que exista una diferencia respecto de otras latitudes, puesto que no existen las estaciones de verano, primavera, otoño, invierno, por tanto, aparecen dos periodos climáticos bien definidos durante un año que son: el periodo poco lluvioso que comprende los meses de noviembre a abril y el periodo lluvioso que abarca a los meses de mayo a octubre, respectivamente.

Otros enfoques ayudan a relacionar in situ las propiedades de las masas de aire (tales como: temperatura, humedad, estabilidad y cobertura nubosa) variando las concentraciones de los contaminantes atmosféricos. Aunque algunas veces estas masas de aire poseen información sobre los vientos, la clasificación es típicamente dominada por los factores termodinámicos.

Para identificar y clasificar los Tipos de Situaciones Sinópticas (TSS) se consideró el patrón de presión y viento predominante además de la existencia o paso de un fenómeno significativo en el orden de las lluvias, tal como un frente u onda, etc. comprendido en la clasificación presenta la prioridad requerida para el período de estudio, año 2007 (Lapinel, 1989).

A continuación se relacionan los TSS según clasificación de Lapinel (1989):

Tipo I: Referido a la cercana influencia de las **Anticiclón del Atlántico (AA)** o de las **Azores Bermudas** (Figura 1.3.1). Este sistema afecta cuando el anticiclón penetra en toda Cuba en forma de cuña, llegando a cubrir el Golfo de México y Sudeste de los Estados Unidos, o bien afecta marcadamente hasta la región Oriental del país.

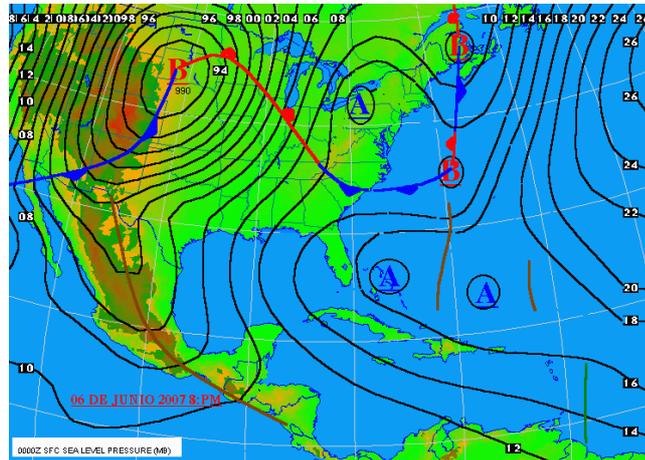


Figura 1.3.1. Tipo de Situación Sinóptica Tipo I, Anticiclón del Atlántico. Fuente: INSMET, 2007

Tipo II: Este tipo se corresponde con aquellas configuraciones del campo bórico cuando la región central del **Anticiclón extendido (AZ)** (Figura 1.3.2) o que se aleja de Cuba, produciéndose un extenso desplazamiento de masas de aire desde su región fuente, lo que permite una modificación mayor de sus características iniciales, producto de una más prolongada interacción océano- atmósfera. Inmersas en este flujo pueden presentarse perturbaciones tales como ondas, hondonadas, etc. Aparecen los subtipos **(II a)** sin hondonada y **(II b)** con hondonada.

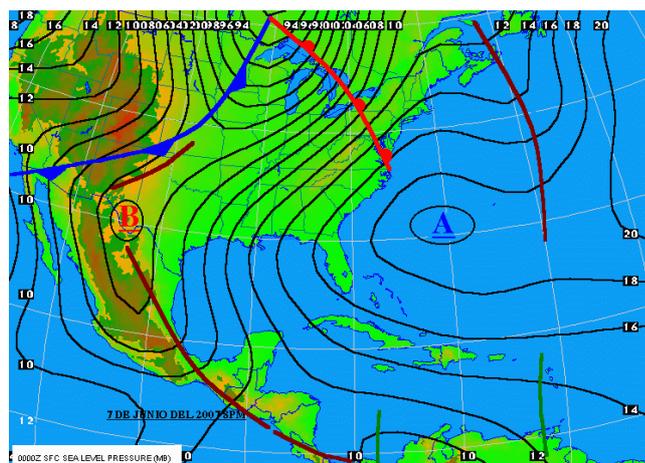


Figura 1.3.2 Tipo de Situación Sinóptica Tipo II, Anticiclón Extendido. Fuente: INSMET, 2007

Tipo III: Esta situación se asocia con las configuraciones del campo bórico con débil influencia anticiclónica o a la existencia de hondonadas, vaguadas o sistemas de bajas (bajas completas), etc., en regiones adyacentes al área cercana a Cuba, por lo que las isobaras presentan en forma espaciada o imprecisa, predominando un **Débil Gradiente bórico (Dg)** (Figura 1.3.3).

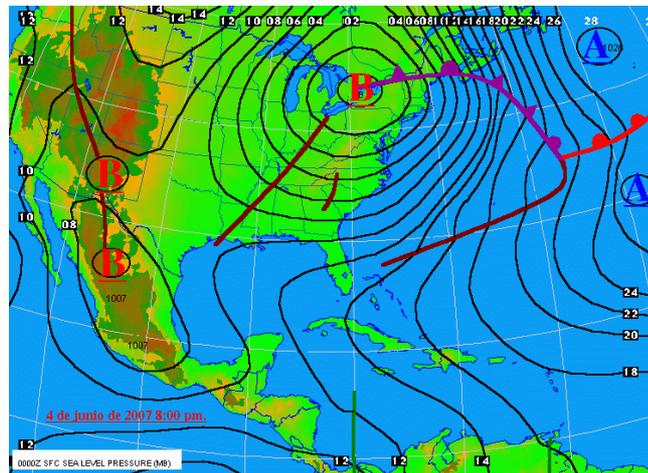


Figura 1.3.3 Tipo de Situación Sinóptica Tipo III, Gradiente débil. Fuente: INSMET, 2007

Tipo IV: Aquí se contempla la influencia de configuraciones bóricas que se relacionan con el desplazamiento cercano o sobre nuestro territorio de **Situaciones Ciclónicas (SC)** (Figura 1.3.4).

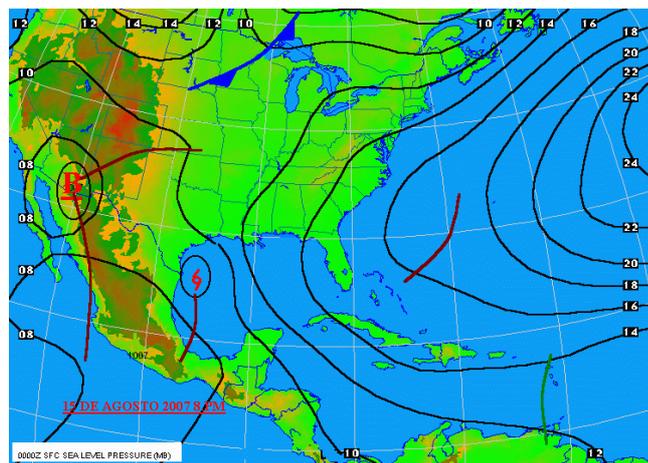


Figura 1.3.4 Tipo de Situación Sinóptica Tipo IV, Situaciones ciclónicas. Fuente: INSMET, 2007

Tipo V: Incluye todas aquellas perturbaciones o disturbios que en diferentes formas de manifestación sobre el territorio nacional, influyen con sus formas de **Zonas de Convergencia (ZC)** (Figura 1.3.5) asociadas y no definidas como otros tipos dentro de la clasificación.

Se generan dos subtipos (**V-a**) ondas y hondonadas que se propagan en el flujo del Este y el (**V-b**) que se refiere a otras situaciones, tales como extensiones meridionales de vaguadas de latitudes medias, líneas de cizalladura entre dos altas, etc., sistemas estos que presentan corrientes del Este poco profundas y de lento movimiento hacia el Este. También en este subtipo otros procesos como reflejo de bajas frías superiores, áreas de bajo barómetro.

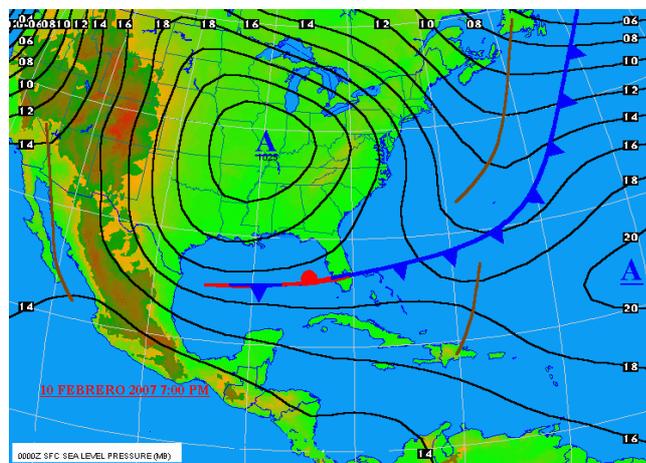


Figura 1.3.5 Tipo de Situación Sinóptica Tipo V, Zonas de convergencia. Fuente: INSMET, 2007

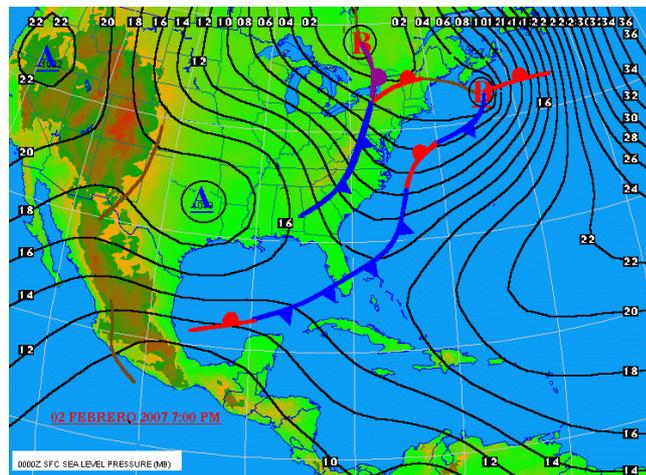


Figura 1.3.6 Tipo de Situación Sinóptica Tipo VI, Baja Extratropical. Fuente: INSMET, 2007

Tipo VI: Se incluyen en este tipo las **Bajas Extropicales (BE)** (Figura 1.3.6) que por regla se desarrollan en zonas troposféricas de intensa baroclinicidad (frentes árticos y polares) resultantes de ondas de grandes dimensiones. Ocasionalmente pueden originarse en el Golfo de

México o en regiones muy cercanas a Cuba. Aparecen para esta categoría de la clasificación dos subtipos que se corresponde con la influencia del sector cálido (VI-a) o frío (VI-b) de la baja.

Tipo VII: En la temporada invernal, los frentes o zonas frontales asociados a las bajas extratropicales, se desplazan acompañadas de una banda de mal tiempo, relativamente estrecha y básicamente responsable de las lluvias que se producen en el periodo poco lluvioso y cuya actividad depende del contraste térmico entre ambas masas. A los efectos de la clasificación se consideraron las estructuras de los frentes, se han considerado 4 subtipos: el frente frío clásico (VII a) (Figura 1.3.7); el frente frío reversino (VII b); el frente cuasi estacionario (VII c) y el frente disipándose (VII d).

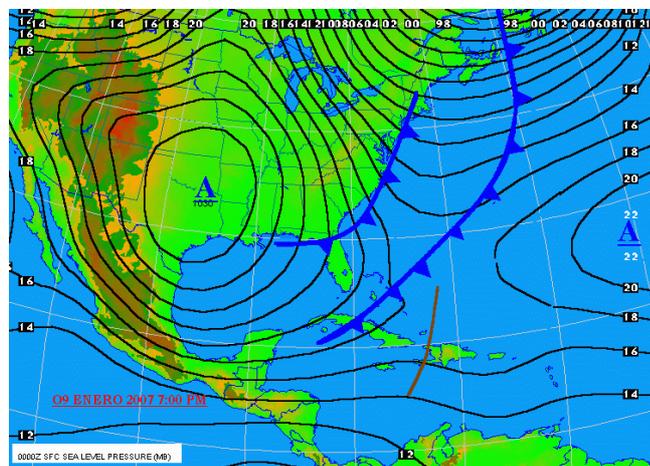


Figura 1.3.7 Tipo de Situación Sinóptica Tipo VII, Frente frío. Fuente: INSMET, 2007

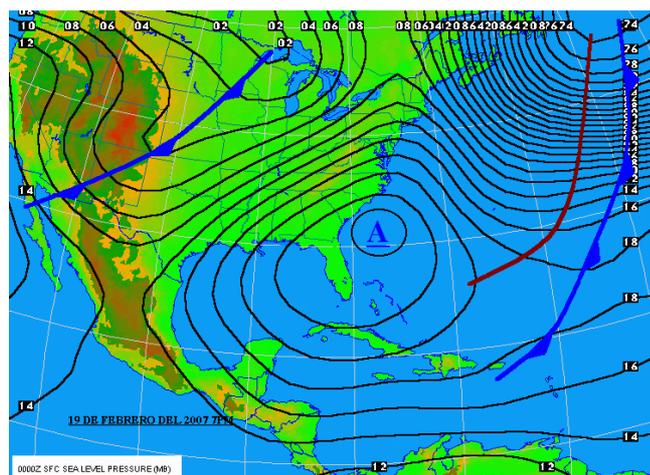


Figura 1.3.8 Tipo de Situación Sinóptica Tipo VIII, Anticiclón migratorio. Fuente: INSMET, 2007

Tipo VIII: Las altas típicas polares continentales de subsidencia del aire polar, tienden por lo general, a desplazarse hacia el Sudeste y luego al Este, hacia el Atlántico. Las trayectorias de estas altas migratorias han sido ampliamente estudiadas. Cuando estos sistemas irrumpen en el territorio nacional puede quedar influenciado por las temperaturas bajas y los vientos de componente Norte. Ahora bien, en su progresivo avance al internarse estos anticiclones en zonas marítimas, ya sea por el Golfo de México, la costa Atlántica de los Estados Unidos, presentan un rápido proceso de transformación debido a la fuerte humectación, pudiendo tener lugar una fusión con el anticiclón del Atlántico o bien un desplazamiento del mismo. De acuerdo a la posición de su centro sobre el continente (**VIII a**), el Golfo de México (**VIII b**), o sobre el océano Atlántico al Este de los Estados Unidos (**VIII c**) (Figura 1.3.8), respectivamente.

1.4 Modelación del transporte y difusión regional de contaminantes atmosféricos

Existen varios modelos de transporte y difusión regional que calculan las concentraciones de contaminantes atmosféricos, muchos de ellos son utilizados para propósitos regulatorios tales como CALPUFF (Scire, 2000b; Levy, 2002) y TAPM (Hurley and Manins, 2003). El CALPUFF es un modelo de dispersión de múltiples capas en estado no estacionario (lagrangiano) por bocanadas *puff* diseñado para modelación de gases y partículas utilizando la variación meteorológica espacial y temporal para simular el transporte dispersión, transformaciones químicas y remoción de los contaminantes atmosféricos. El modelo CALPUFF ha sido utilizado en diversos estudios para investigar la dispersión de compuestos gaseosos y las partículas (Sang-Keun *et al.*, 2008; Alvarado *et al.*, 2009; MacIntosh *et al.*, 2010).

En general, CALPUFF ha mostrado correspondencia razonable con las concentraciones de los contaminantes en los estudios de validación y las discrepancias aparecen como resultado de fuentes desconocidas. Según (Davakis *et al.*, 2007; Alessandrini *et al.*, 2010) la asimilación de los datos meteorológicos son incorporados de un modelo numérico de predicción del tiempo que se acopla a un modelo de dispersión y transporte, por lo tanto existe una mejor correspondencia entre las predicciones de las concentraciones con los valores del campo monitoreados.

Los enfoques básicos para la construcción de los campos meteorológicos típicamente utilizan un modelo de pronóstico o un modelo de diagnóstico. Los modelos de diagnóstico (Sherman, 1978; Goodin *et al.*, 1980; Douglas y Kessler, 1988; Bellasio *et al.*, 2005) tienen en

cuenta las observaciones disponibles, la topografía del terreno así como también incorporan supuestos como la conservación de masa (Pielke y Uliasz, 1998).

El modelo meteorológico de diagnóstico CALMET (Scire *et al.*, 2000a) es utilizado para generar los campos de viento y temperaturas horarias tridimensionales, y diversos parámetros de la capa límite. La entrada de modelo CALMET incluye parámetros geofísicos, datos meteorológicos de superficie, de aire superior y de precipitación. En este caso, los datos geofísicos incluyen categorías de uso de suelo y altura del terreno a partir de la base de datos del Censo Geológico de los Estados Unidos (*United State Geological Survey*, USGS, siglas en inglés).

Los modelos de diagnóstico interpolan las observaciones y son típicamente dependientes de la calidad y densidad de las observaciones. A pesar de sus limitaciones, han sido ampliamente utilizados en los estudios de modelación de la calidad del aire. Los modelos meteorológicos de pronóstico (los cuales resuelven las ecuaciones primitivas que gobiernan el estado de la atmósfera) son ampliamente utilizadas para proporcionar los datos meteorológicos de entrada para los estudios de modelación de la calidad del aire (Pielke y Uliasz, 1998; Sistla *et al.*, 2000).

En particular, el Sistema de modelación **CALPro** CALMET/CALPUFF (Scire, 2000b), el que ha sido desarrollado por *Earth Tech* (Concord, MA) y es el modelo propuesto por la USEPA a partir del 2003 como modelo de uso regulatorio para realizar la modelación detallada de los procesos de dispersión de contaminantes atmosféricos, en dominios regionales (a distancias de la fuente entre 50 y 200 km, con valores aceptables hasta 300 km), utilizando campos de vientos tridimensionales, aunque también puede ser usado para dominios locales (de 0 a 50 km de distancia de la fuente) en casos de vientos complejos.

Los datos geofísicos en el dominio de la modelación se derivan de un modelo digital de elevación (*Digital Elevation Model*, DEM, siglas en inglés) producido por el Censo Geológico de los Estados Unidos (USGS, 2002). Este archivo generado cubre 1 x 1 grados de latitud y longitud y el USGS utiliza una escala de 1:250 000. Los datos geofísicos del DEM tiene una resolución de aproximadamente 300 metros (Figura 1.4.1).

Los datos de uso del suelo se basan en el formato de celdas con composición temática utilizando el nivel I de las categorías de uso del suelo USGS. Las categorías de uso del suelo fueron cartografiadas en el CALMET por 14 categorías de uso del suelo.

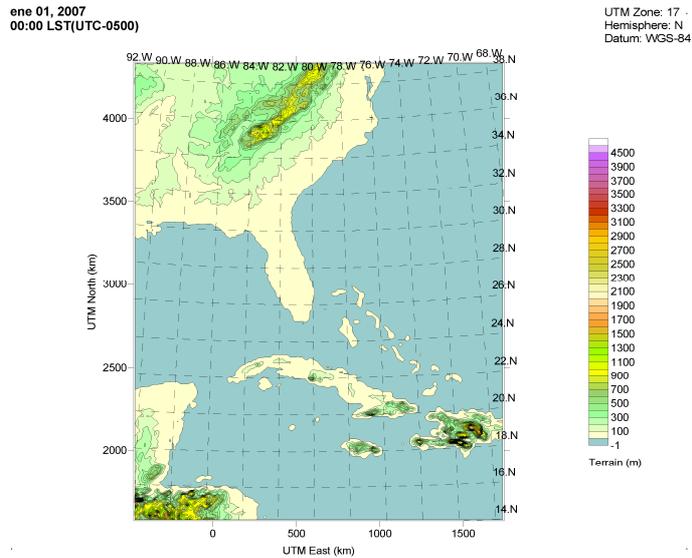


Figura 1.4.1. Modelo Digital de Elevación para el dominio del estudio

Estas características únicas del sistema de modelación **CALPro** hacen que sea posible su uso para simular la dispersión de los contaminantes NO_x y SO_2 y su deposición húmeda como nitrato (NO_3^-) y sulfato (SO_4^{2-}), respectivamente, en un entorno de terreno complejo a partir de la variabilidad de las condiciones meteorológicas, pronosticadas en la rejilla o dominio del estudio, que en este caso considera las emisiones desde el territorio nacional (Cuba) y la parte del Sudeste de los Estados Unidos, alcanzándose 28 puntos de altas emisiones de NO_x y SO_2 , obtenidas a partir del total de horas anuales de operación de las centrales termoeléctricas inventariadas para el estudio.

El sistema de modelación **CALPro** consta de cuatro componentes principales que son:

1. **CALMET:** Es el módulo de diagnóstico meteorológico en tres dimensiones.
2. **PRTMET:** Es el módulo de post-procesamiento de las salidas del modulo CALPUFF.
3. **CALPUFF:** Es un módulo de transporte, dispersión y transformación química de los contaminantes atmosféricos.
4. **CALPOST:** Es un módulo de post-procesamiento de las salidas del modulo CALPUFF.

La mayoría de las aplicaciones del sistema giran en torno a éstas cuatro componentes. Para facilitar su funcionamiento el sistema provee una interfaz gráfica o *GUI* que se usa para preparar los archivos de control que configuran cada corrida, ejecutar los componentes del modelo correspondiente y guiar las funciones de manejo de cada archivo. El archivo de control de cada

componente es un simple archivo texto que puede ser editado en dependencia de los requerimientos del usuario.

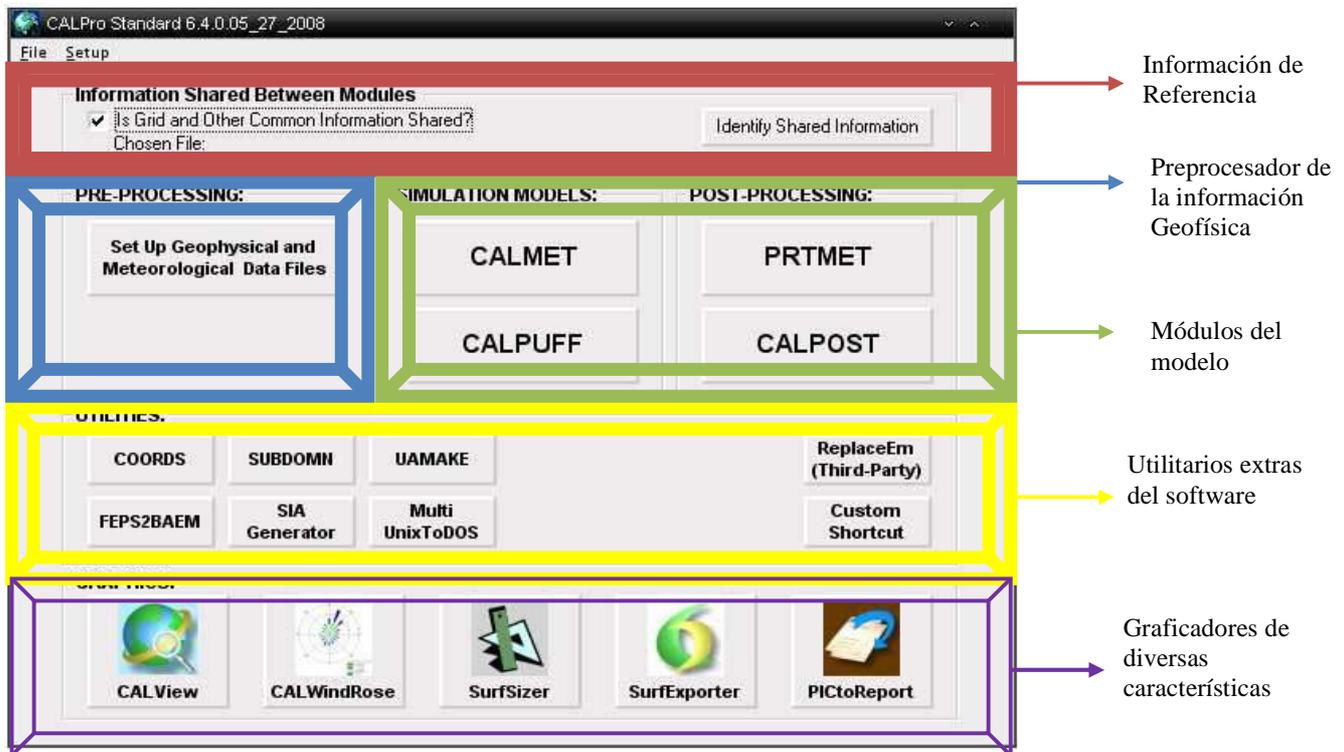


Figura 1.4.2 Configuración del Sistema de Modelación *CALPro*

La Figura 1.4.2 representa la configuración del sistema de modelación que incluye además de los cuatro componentes principales del sistema y pre-procesadores, un conjunto de utilitarios que no están incluidos en el sistema de modelación *CALPro* pero que pueden ser asociados a través de sus distintos módulos.

Y del conjunto de pre-procesadores:

TERREL: Introduce los datos de elevación del terreno en una rejilla de modelación especificada por el usuario.

CTGPROC: Introduce los datos de usos de suelo y cobertura terrestre en el dominio (o rejilla) del estudio.

MAKEGEO: El pre-procesador geofísico final que lee los datos de usos de suelo y elevaciones del terreno y produce un archivo de salida como entrada para CALMET.

En el modelo de los radialmente simétricos se plantea una ecuación gaussiana que representa la contribución de un *puff* al receptor, la cual se integra para todos los *puff* con el

objetivo de determinar la concentración media total en el receptor para el instante de tiempo de muestra (Scire et al., 2000a).

La expresión básica para calcular la contribución de un puff a un receptor es:

$$C = \frac{Q}{2\pi\sigma_x\sigma_y} g \exp\left[-\frac{d_a^2}{2\sigma_x^2}\right] \exp\left[-\frac{d_c^2}{2\sigma_y^2}\right] \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$g = \frac{2}{(2\pi)^{1/2}\sigma_z} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{(H_e + 2nh)^2}{2\sigma_z^2}\right] \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

C : es la concentración al nivel del suelo (g/m^3)

Q : es la masa del contaminante en el *puff* (g)

σ_x : es la desviación estándar de la distribución Gaussiana, a favor de la dirección del viento (m)

σ_y : es la desviación estándar de la distribución Gaussiana, transversal a la dirección del viento (m)

σ_z : es la desviación estándar de la distribución Gaussiana, en la dirección vertical (m)

d_a : es la distancia desde el centro del *puff* al receptor, a favor de la dirección del viento (m)

d_c : es la distancia desde el centro del *puff* al receptor, transversal a la dirección del viento (m)

g : es el término vertical de la ecuación Gaussiana (m)

H_e : es la altura efectiva sobre el nivel del suelo, del centro del *puff* (m)

h: es la altura de la capa de mezcla (m)

La sumatoria en el término vertical (g), cuenta con múltiples reflexiones entre la capa de mezcla y el suelo. Esto reduce la uniformidad de mezcla límite de $1/h$ para $\sigma_z > 1.6h$. En general, los *puffs* o bocanadas dentro de la capa límite convectiva cumplen este criterio unas pocas horas después de su liberación. Para los *puffs* simétricos con respecto a un eje horizontal, con $\sigma_x = \sigma_y$, la Ecuación (1) se reduce a:

$$C(s) = \frac{Q(s)}{2\pi\sigma_y^2(s)} g(s) \exp\left[-\frac{R^2(s)}{2\sigma_y^2(s)}\right] \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

R: es la distancia (m) desde el centro del *puff* al receptor;

S: es la distancia (m) viajada por el *puff*

Las variables dependientes de la distancia en la Ecuación 3 son indicadas (ejemplo: $C(s)$, $\sigma_y(s)$, etc.). Integrando la (Ecuación 3) en función de la distancia que el *puff* viaja (ds), se obtiene la concentración promedio en el tiempo \bar{C} .

$$\bar{C}(s) = \frac{1}{ds} \int_{s_0}^{s_0+ds} \frac{Q(s)}{2\pi\sigma_y^2(s)} g(s) \exp\left[-\frac{R^2(s)}{2\sigma_y^2(s)}\right] ds \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde s_0 es el valor de s al inicio del paso de muestreo.

Un *slug* puede ser visualizado como un grupo de *puffs* circulares solapados a lo largo de la dirección del viento, con una pequeña separación entre los *puff*. De hecho, el *slug* representa una continua emisión de *puffs*, cada uno contiene una infinitesimal masa $q dt$. La longitud del cuerpo principal del *slug* es u , donde u es la rapidez del viento y Δt_e es el tiempo de emisión del contaminante. La ecuación que describe la concentración de contaminantes en un receptor debido a un *slug* depende del mismo término vertical que el modelo anterior (que incluye la altura del *puff* sobre el terreno y la altura de la capa de mezcla), pero en este caso la distancia del *puff* al receptor se mide como una distancia transversal y , a diferencia del caso anterior, dos distancias en la dirección del viento, una al punto más viejo y otra al punto más joven del *slug*.

Existe además una dependencia entre la rapidez del viento (m/s) y la varianza de la rapidez del viento. También se añade una función casuística que toma en cuenta el efecto de borde en los extremos del *slug*. Esta función es cero en receptores lejanos al *slug* donde los contaminantes no han llegado o ya pasaron y toma el valor 1 para un receptor en el centro del *slug* (en este caso el valor 1 indica la ausencia de efectos de borde). En este caso la ecuación no puede integrarse analíticamente, sino numéricamente, y para esto se utiliza una aproximación lineal de la tasa de emisión efectiva. Entonces, la concentración debido a la presencia de un *slug* puede ser descrita como:

$$C(t) = \frac{Fq}{(2\pi)^{1/2} u' \sigma_y} g \exp\left[\frac{d_s^2 u^2}{2\sigma_y^2 u'^2}\right] \quad (\text{Ecuación 5})$$

Con

$$F = \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{erf} \left[\frac{d_{a2}}{\sqrt{2}\sigma_{y2}} \right] - \operatorname{erf} \left[\frac{-d_{a1}}{\sqrt{2}\sigma_{y1}} \right] \right\} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde:

u : es el vector de la velocidad media del viento (m/s)

u' : es la rapidez del viento escalar definida según la siguiente fórmula:

$$u' = (u^2 + \sigma_v^2)^{1/2}$$

Donde

σ_v : la varianza de la rapidez del viento

q : es la tasa de emisión de la fuente (g/s)

F : es una función casuística

g : es el factor de acoplamiento vertical de la (Ecuación 1)

erf : es la función error

Las cantidades d_c y d_a son distancias transversales de los *slug* (transversales al eje del *slug*) y en la dirección del *slug* respectivamente, al receptor. Los subíndices 1 y 2 en los coeficientes de dispersión están referidos al valor más antiguo y actual del final del *slug*, respectivamente. La ausencia de un subíndice numérico indica un valor definido en el receptor (Scire et al., 2000a).

Variables geofísicas

Un modelo que emite campos de viento debe considerar factores topográficos en la modelación, esto debido a que es necesaria una adecuación de las líneas de flujo del aire a las restricciones que impone la topografía compleja, de esta forma la modelación debe ajustar matemáticamente los campos de viento iniciales al relieve complejo, tratando de simular los efectos de canalizaciones, aceleraciones y desaceleraciones que la topografía introduce sobre los vientos superficiales.

En el caso de CALMET, el módulo geofísico incluye la información de la topografía y el uso del suelo, de este último se deducen rugosidades superficiales, las cuales son utilizadas para la extrapolación vertical del modelo.

Para la topografía, CALMET utiliza un Modelo Digital de Elevación (DEM, siglas en inglés) *GTOPO30*. Este fue desarrollado por el *United Geological Survey's EROS Data Center*. La información contenida en el *GTOPO* cubre un área global cuya extensión latitudinal va entre los 90° latitud Norte y los 90° latitud Sur, y cuya extensión longitudinal va entre los 180° longitud este hasta los 180° longitud oeste. El espacio horizontal de la rejilla corresponde a 30 arco segundos (0,008333°), aproximadamente un 1 km.

En el caso del uso del suelo, el modelo utiliza la base de datos *The Global Land Cover Characterization* (GLCC), la cual fue desarrollada por la *U.S. Geological Survey* (USGS), la Universidad de Nebraska Lincoln (UNL), y el *European Commission's Joint Research Centre* (JRC), quienes generaron una base de datos global de usos de suelo de 1 kilómetro de resolución para ser aplicada en las ciencias ambientales y la modelación.

El procesamiento previo con CALMET es complicado y requiere de personal calificado en su uso. Los pasos de este pre-procesamiento son numerosos y complejos. Sin embargo, a pesar de las quejas, EPA se ha negado a la sugerencia de no usar CALMET. Considera que esto es necesario para no sacrificar las fortalezas de CALPUFF.

El módulo CALMET requiere de una enorme cantidad de información de entrada, la que obtiene de sus correspondientes pre-procesadores:

- Datos geofísicos (GEO.DAT), procesados con MAKEGEO, que integra a TERREL (datos del relieve del terreno) y CTGPROC (procesador sobre el uso del suelo);
- Datos meteorológicos de superficie que son convertidos a formatos específicos para poder ser procesados con programas específicos (CALSURF, CALUP y CALPREC) para generar el archivo de datos meteorológicos SURF.DAT.

El módulo CALPUFF realiza los cálculos sobre la base de datos detallados (en forma de rejilla), o también sobre la base de datos meteorológicos más simples (que no están en forma de rejilla), con lo que el cálculo se asemeja a los modelos de penachos convencionales. Es decir, la diferencia la hace el grado de detalle de los datos. Los archivos de salida primarios de CALPUFF son las distribuciones espaciales (en las posiciones del receptor) y temporales de las concentraciones de contaminantes y los flujos de depositación.

Mecanismos de transformaciones químicas

Uno de los criterios de diseño del módulo CALPUFF es el de contar con la capacidad requerida para modelar los efectos de las transformaciones químicas. El módulo químico de CALPUFF contiene cuatro opciones para el tratamiento de los procesos químicos:

1. Un mecanismo de reacción química de pseudo primer orden para la conversión de SO_2 en SO_4^{2-} y de NO_x ($\text{NO} + \text{NO}_2$) a aerosoles de nitrato (NO_3^-). Este mecanismo se basa en el esquema de transformación química usado en el modelo MESOPUFF II (Scire et al., 1984), el cual incorpora las dependencias más significativas de las tasas de transformación respecto a condiciones ambientales variables, temporal y espacialmente. Este es un esquema que modela 5 especies (SO_2 , SO_4^{2-} , NO_x , HNO_3 y NO_3^-).
2. El esquema RIVAD/ARM3 (Morris et al., 1988), el cual simula los procesos de conversión del NO y NO_2 , y del SO_2 a SO_4^{2-} , el equilibrio entre HNO_3 gaseoso y el aerosol de nitrato de amonio. Esta es una modificación a un esquema de 6 especies (SO_2 , SO_4^{2-} , NO , NO_2 , HNO_3 y NO_3^-) donde NO y NO_2 son explícitamente tratados.
3. El método SOA (Aerosoles Orgánicos Secundarios), de 5 especies, el cual simula las transformaciones atmosféricas de los compuestos aromáticos, hidrocarburos biogénicos y las mezclas atmosféricas relevantes que incluyan los gases sintéticos de escape de los autos. El rendimiento del método SOA está definido por la cantidad de aerosoles orgánicos producidos por unidad de hidrocarburos reaccionado.
4. El método de modelación de niebla, de 2 especies.

La opción 3 es la apropiada para modelar la dispersión de los contaminantes producidos por instalaciones petroquímicas, mientras que la 1 y la 2 son las óptimas para modelar los producidos por instalaciones energéticas.

El módulo CALPUFF también necesita la especificación de variables que influyen en los mecanismos de transformaciones químicas, estas son:

- Las tasas de conversión nocturnas (para estas se utilizaron los valores predefinidos).
- Modelación de la fase acuosa de las transformaciones químicas (opción que no se activó).
- Concentraciones de fondo de Ozono y Amonio. Deben introducirse las concentraciones mensuales de fondo de ozono y amonio ambientales. En el caso del O_3 , pueden leerse desde el

archivo OZONE.DAT que contiene las observaciones horarias de las concentraciones de ozono en una o más estaciones de monitoreo, o introducirse las propias a través del mismo CALPUFF.

De los 4 mecanismos incluidos en el modelo, solo cumplen con las necesidades del estudio que se va a realizar, el MESOPUFF II de 5 especies (opción 1) y el RIVAD/ARM3 de 6 especies (opción 2). En la Figura 2.7.4 se representan las transformaciones químicas (usadas en CALPUFF) que originan a los contaminantes secundarios. El NA y el H_2SO_4 se refieren a los aerosoles de nitrato y sulfato respectivamente. El aerosol de nitrato total (recuadro con líneas discontinuas a la izquierda) incluye NA y NH_4NO_3 y el aerosol de sulfato total (recuadro con líneas discontinuas a la derecha) incluye H_2SO_4 y $(NH_4)_2SO_4$. El proceso de emisión está indicado por flechas rojas y las transformaciones químicas por flechas negras. También se indica la deposición seca y húmeda, representada por flechas verdes y azules, respectivamente.

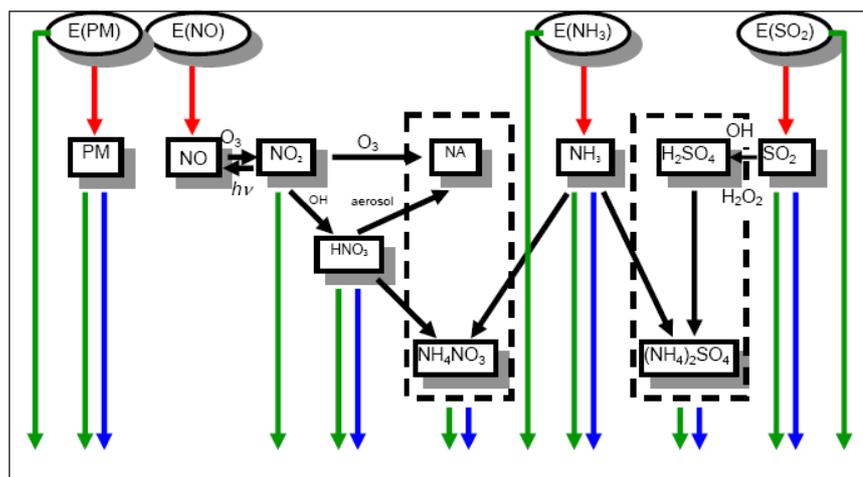


Figura 1.4.3 Mecanismo químico que conduce a los procesos de deposición seca y húmeda. Fuente: Tomado de Trukenmüller, et al., (2001)

Deposición

La transferencia y deposición de los contaminantes sobre una superficie abarca muchos procesos complejos. En la deposición se tienen en cuenta la deposición seca y la húmeda. A cada especie contaminante se le debe seleccionar el tipo de deposición que se le modelará.

Deposición húmeda

Un enfoque empírico del coeficiente de arrastre es utilizado en CALPUFF para calcular el agotamiento y los flujos de deposición húmeda debido al arrastre de la precipitación. Los

coeficientes del arrastre se especifican en función del contaminante y del tipo de precipitación. CALPUFF para modelar la deposición húmeda de cada especie necesita de los valores de los Coeficientes de Arrastre (1/s) para las Precipitaciones Líquidas y para las Congeladas, donde todos los valores usados fueron los predeterminados.

Dispersión

Una consideración clave en la modelación con CALPUFF es la determinación de los coeficientes de dispersión gaussianos horizontales y verticales (σ_y y σ_z) al inicio y al final de cada paso de muestreo (el modelo usa sigmas específicos del receptor), para cada *puff* y también para cada receptor en el cual la nube tiene una contribución calculada durante el paso de muestreo. Como el tamaño de la nube es continuo entre dos pasos de muestreo consecutivos, los coeficientes para la localización del *puff* al inicio de un paso son iguales a los existentes al final del paso de muestreo precedente. Dichos coeficientes al final del paso de muestreo, o en las cercanías de los receptores durante el paso de muestreo, se calculan a partir de la relación de crecimiento para un ambiente turbulento (para las condiciones de dispersión específicas de esa posición e instante de tiempo) y de la posible varianza constante relativa a la fuente.

En CALPUFF, la dispersión está definida específicamente por los siguientes parámetros:

- Ecuación de Heffter. Para el transporte a larga distancia cuando la dimensión lateral de la pluma alcanza valores críticos CALPUFF prevé la necesidad de un cambio de modelo para el cálculo de σ_y y σ_z , la transición ocurre cuando se pasa de un modelo dependiente de la distancia, a otro más sencillo dependiente del tiempo (Heffter et al., 1965). Si se asumen tasas de dispersión bajo condiciones neutrales, el ancho del penacho llegará al σ_y predefinido (550 m) después de aproximadamente los 10 km de distancia recorrida. En esta opción se dejó el valor predefinido por CALPUFF y la posibilidad de usar la ecuación de Heffter para calcular σ_z al mismo tiempo que σ_y no fue habilitada.
- Métodos para calcular la dispersión. CALPUFF brinda posibilidades para el uso de los datos más refinados de que se disponga, para con estos realizar el cálculo de los coeficientes de dispersión por turbulencia atmosférica, pero al mismo tiempo cuenta con otros algoritmos de respaldo que no requieren datos especializados para cuando dichos datos no estén disponibles. Hay 5 opciones de cálculo posible a las cuales corresponden tres niveles de entrada de datos:

- La opción 1 se basa en el cálculo de los coeficientes de dispersión por turbulencia atmosférica a partir de valores medidos directamente de la dispersión de la rapidez del viento en las direcciones horizontal y vertical (σ_v y σ_w , respectivamente).
- La opción 2, que es la empleada. Esta consiste en calcular internamente los valores de σ_v y σ_w usando variables micro meteorológicas obtenidas a partir de la ejecución del módulo CALMET. En esta aproximación se estiman las componentes de la turbulencia en las direcciones vertical y transversal al viento basándose en la teoría de semejanza.
- Las restantes variantes posibles (opciones 3, 4 y 5) son modelos más aproximados basados en los coeficientes de dispersión Pasquill-Gifford, etc. También aparece la opción de usar la Función de Densidad de la Probabilidad (*PDF*, siglas en inglés), que es un método para calcular la σ_z en la capa límite convectiva.

La *PDF* toma en cuenta explícitamente las diferencias entre la distribución y fortaleza de las corrientes ascendentes y descendentes en la capa, las cuales se relacionan con la distribución de la concentración media de conjunto, pero lo recomendado es no activarla.

- Método usado por la escala de tiempo Lagrangiana, que tiene 3 opciones:
 - Sin advección turbulenta.
 - Calculada (opción usada).
 - Entrar valores directamente.
- Opciones de la turbulencia, las cuales son:
 - Sin advección turbulenta.
 - Calculada (opción usada).
 - Entrar valores directamente.
- Método de modelación del penacho: El módulo CALPUFF utiliza dos tipos de métodos: el primer método utiliza *puff* radialmente simétricos, mientras que el otro utiliza *slug*. El módulo CALPUFF permite seleccionar una de las dos variantes, pero también las utiliza automáticamente a ambas en un modelo híbrido que aprovecha ambos algoritmos, utilizando los *puff* alargados (*slug*) en la zona de transición cercana a la fuente y los *puff* circulares en las zonas más alejadas.

En el módulo CALPUFF se implementaron originalmente el modelo *slug* y dos variantes del modelo con *puff* circulares. La primera de estas variantes usa las propiedades locales específicas del *puff* en cada paso de muestreo (se evalúan las alturas y las sigmas en el punto medio de un paso) mientras que la segunda usa las propiedades específicas del receptor. Esta

última es la que finalmente quedó formando parte de CALPUFF. Ella se denomina modelo de *puff* integrado CALPUFF. El módulo CALPUFF prevé el uso del modelo híbrido pues se adecua a lo que resulta computacionalmente más eficiente en cada caso. El modelo almacena la información necesaria para ello, al menos en la etapa inicial en que $\sigma_y / (udtc)$ es pequeña. Esta relación compara el esparcimiento de la nube en cada punto final del *slug* con la longitud del *slug*. En la lejanía la elongación inicial del *slug* puede resultar poco significativa respecto al crecimiento de la nube debido a la difusión σ_y y el muestreo de *puff* resulta representativo del impacto de la nube. Sin embargo, para receptores cercanos, con cambios bruscos en la tasa de emisión y la dirección del viento, el método *slug* es el recomendado.

1.5 Formación de ozono troposférico

El ozono troposférico es un contaminante secundario que se produce principalmente por las reacciones fotoquímicas entre óxidos de nitrógeno, hidrocarburos orgánicos volátiles (COV) y oxígeno (Seinfeld, 1986).

Las reacciones de síntesis del ozono en el medio ambiente son muy complejas y dependen de un modo importante de las condiciones climáticas, como la temperatura e irradiancia (Sillman, 1999). El siguiente figura 1.5.1 es una simplificación de los procesos de formación y destrucción del ozono:

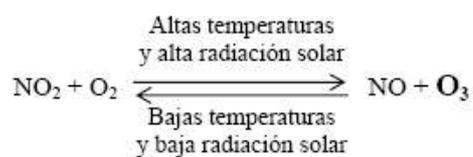


Figura 1.5.1. Proceso de formación y destrucción del ozono troposférico. Fuente: Adaptado de (Sillman, 1999)

La contaminación atmosférica se origina fundamentalmente en zonas urbanas e industriales, pero los procesos de transporte de la atmósfera pueden dar lugar a un aumento de la concentración de los contaminantes en zonas alejadas de las áreas de inmisión o formación. La contaminación por ozono es un problema global, ya que se ha demostrado que existe un transporte intercontinental de ozono (Derwent et al., 2004). La concentración media global de ozono ambiental fue aproximadamente 50 ppb en el año 2000 (Fiscus et al., 2005), y las predicciones

más pesimistas sugieren futuros aumentos de hasta 80 ppb (v) para el año 2100 (Prather et al., 2001; Vingarzan, 2004).

Los perfiles de ozono observados tienen además un carácter claramente estacional, permaneciendo en niveles más altos en los meses de verano, cuando las altas temperaturas y radiación solar favorecen su formación. Las concentraciones de ozono troposférico dependen, además de la hora del día y de la estación, de la localización geográfica y de las condiciones meteorológicas (Velázquez, 1997). Por lo tanto, la relación exacta entre los niveles de sus precursores y las concentraciones de ozono es altamente compleja (Pastor-Bárceñas *et al.*, 2005).

En la Figura 1.5.2 se representan las concentraciones de ozono a escala mundial para el año 2030 calculadas mediante el modelo STOCHEM (Collins *et al.*, 2000). Se aprecia que, en las estaciones remotas del Hemisferio Sur, los niveles son más bajos que para latitudes comparables en el Hemisferio Norte. Por su parte, en las regiones tropicales el ozono es aportado, fundamentalmente, por reacciones fotoquímicas en relación con la quema de biomasa; los escasos datos disponibles para los trópicos muestran que el ozono troposférico es menos abundante que en latitudes medias y relativamente más abundante en el norte de los trópicos que en el sur (Velázquez, 1997).

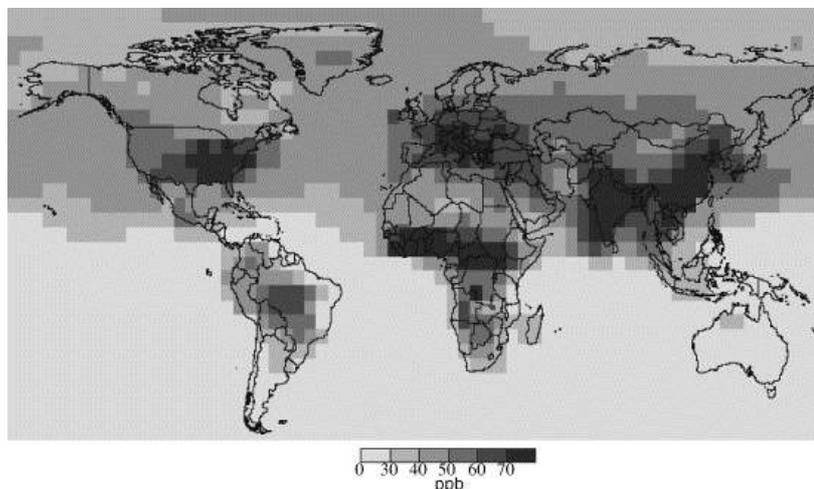


Figura 1.5.2 Concentraciones medias de ozono para el año 2030. Datos producidos por el modelo global de ozono Fuente: Adaptado de STOCHEM, Collins et al., (2000).

CAPITULO 2. MATERIALES Y MÉTODO

2.1 Dominio del estudio

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



Figura 2.1 Dominio del Estudio

2.2 Base de datos meteorológicos globales

El estudio consideró la utilización de dos conjuntos de datos provenientes de la Base de Datos NNR, el primero solamente contempló los valores de los campos meteorológicos de superficie, y el segundo, los valores correspondientes al perfil atmosférico vertical. Este último expresado en unidades de presión en hectoPascal (hPa) consideradas como superficies homogéneas de presión o niveles mandatorios: 1000, 925, 850, 700, 600 y 500 hPa. Se utilizó una rejilla de datos de corto plazo (*short-term*), que entregan valores promedios cada 6 horas para el año 2007.

2.3 Procesamiento de las imágenes NNR

La rejilla de valores de los campos meteorológicos provenientes del NNR se descargaron desde archivos de extensión (.NetCDF¹) en formato binario, se procesaron con el programa *GrADS*, el cual es gratuito, y permite manejar y visualizar los archivos provenientes de la base de datos del estudio. La Figura 2.2 muestra la visualización utilizando el software *GrADS*, con una resolución espacial de 2.5° x 2.5° latitud-longitud.

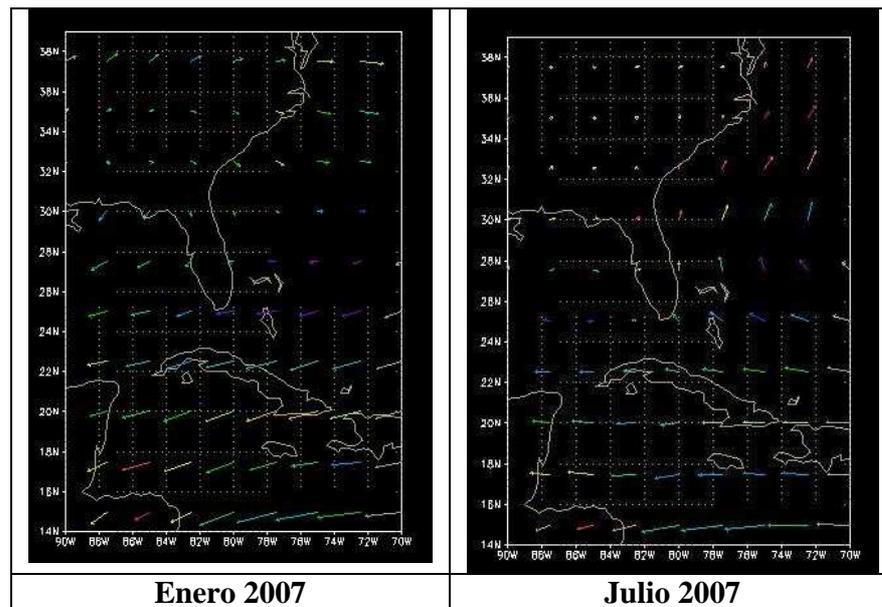


Figura 2.2. Visualización de los vectores de vientos promedio mensuales para los meses de Enero y Julio / 2007 en el dominio del estudio.

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.

Posteriormente los archivos en formato binario fueron convertidos a formato *ráster* sin extensión, los cuales fueron manejados con algunos *softwares* para el procesamiento de imágenes tales como: *IDRISI Andes*, *ENVI 4.3*, entre otros. Estos *softwares* fueron desarrollados para la investigación en percepción remota, lo cual permite realizar análisis espaciales de las imágenes *ráster* de manera rápida y eficiente.

Interpolación espacial: La principal deficiencia de los datos del proyecto **NNR** es la baja resolución espacial, esto es debido a 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.

¹ *Network Common Data Form: Formulario de datos comunes de la Red*

Interpolación temporal: Los datos entregados por el proyecto NNR corresponden a valores promedios de cada 6 horas, que es la menor resolución temporal que se encuentra disponible. Sin embargo, para la ejecución del módulo meteorológico CALMET del sistema de modelación *CALPro* como entrada se necesita ingresar datos horarios para caracterizar mejor las variaciones diarias en la simulación.

Para solucionar esto, los datos de cada 6 horas fueron interpolados temporalmente y se obtuvo datos horarios para todo el periodo del 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.

Su principal ventaja es que el uso del polinomio de bajo orden evita las oscilaciones bruscas o cambios repentinos producidos al interpolar con polinomios de orden superior, lo que permite ajustar curvas complejas mediante un fácil cálculo y una representación simple.

Este método de interpolación fue validado previo a su aplicación a los datos del **NNR**; para esto se utilizó una serie de datos horarios observados provenientes de una estación meteorológica ubicada en Casablanca. A esta serie de datos se le eliminaron datos dejando valores con una frecuencia de 6 horas, de forma de replicar la temporalidad de los datos del **NNR**. Esta nueva serie de datos de la estación meteorológica fue interpolada por el método *Spline*, creando una tercera serie de datos horarios de vientos calculados para Casablanca, estos últimos fueron comparados con la serie de datos originales observados mediante un análisis de correlación lineal, lo cual permitió establecer cuan adecuado era este método para estimar los datos de viento.

2.4. Caracterización climática para la estación meteorológica Casablanca en el período del estudio.

Para este estudio se utilizó la información de la estación meteorológica Casablanca, la cual consta de registros horarios de los campos meteorológicos pertenecientes a la Red de Estaciones Meteorológicas de Superficie del Instituto de Meteorología de Cuba, en el período de un año, 2007. Antes de procesar los datos de la estación meteorológica Casablanca, La Habana, se determinó un filtro para eliminar los valores anómalos en las series climatológicas producto de algún registro erróneo por fallas en los instrumentos de medición o insuficiencias en el manejo del dato meteorológico.

Para esto se generó una rutina en *Visual Basic Excel* que calcula la media y la desviación estándar de la serie total climatológica en cuestión. Para anular cualquier valor anómalo se definió como valor anómalo cualquier registro n veces la desviación estándar de la serie de datos de la variable climatológica considerada, por lo tanto el algoritmo del filtro es el siguiente:

$$|x_i - \bar{X}| > a.S \Rightarrow A \quad (\text{Ecuación 8})$$

$$|x_i - \bar{X}| < a.S \Rightarrow B \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde x_i es el valor de cada elemento de la serie de datos de la variable filtrada, \bar{X} es la media aritmética de la serie de datos de la variable filtrada, a es una constante y S es la desviación estándar de la serie climatológica.

Por lo tanto, si se cumple la A se tiene que eliminar el valor x_i de la serie de datos por considerarse anómalo. Por el contrario si se cumple B el valor x_i permanece en la serie de datos de la variable correspondiente.

Una vez filtrados las series de datos de la estación meteorológica, se procedió a la evaluación del método de interpolación temporal para las series de datos correspondiente a las variables meteorológicas para la estación meteorológica seleccionada y que permite justificar el uso de dicho algoritmo para los datos del proyecto **NNR**.

A continuación en la Figura 2.3 se muestran los resultados de la aplicación para un periodo de tiempo de veinticuatro horas del método de interpolación segmentaría o *Spline* a partir de un conjunto de datos extraídos del proyecto **NNR** (cada 6 horas). Se puede observar la curva suave resultante de un polinomio de bajo orden, que evita los cambios bruscos o repentinos en la serie de datos (Lang, 2010).

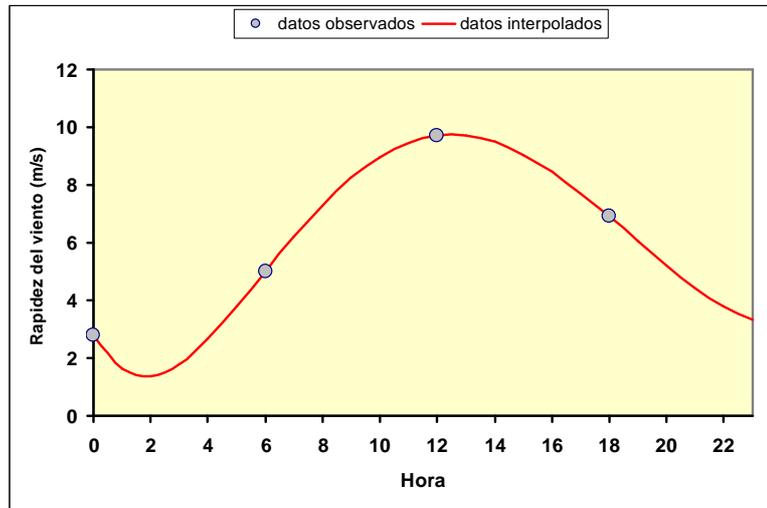


Figura 2.3 Relación entre los valores observados y estimados por el método de interpolación segmentario o *Spline*. Casablanca, 26/05/2007

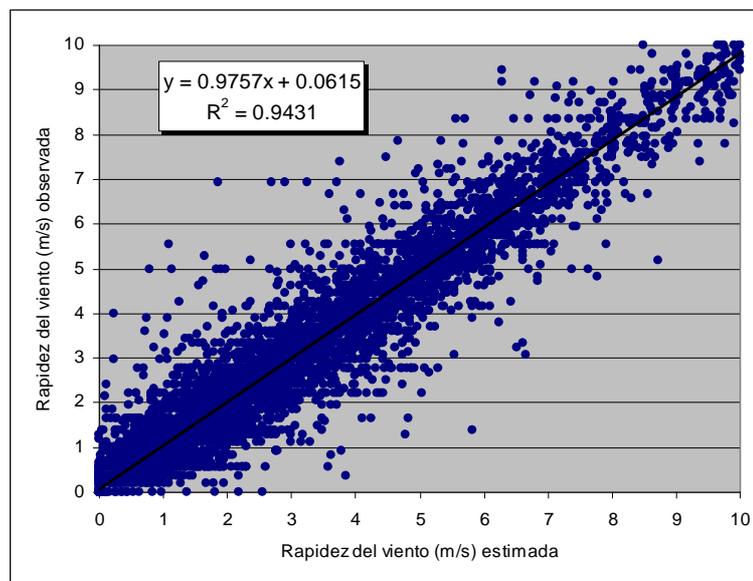


Figura 2.4 Gráfico de dispersión entre las series de la rapidez del viento simulada y observada para la estación meteorológica de superficie Casablanca

Antes de aplicar la interpolación temporal se realizó un análisis de la sensibilidad del métodos con datos horarios medidos en la estación meteorológica de referencia Casablanca del INSMET, los resultados se muestran en la Figura 2.4, en la cual se muestra la correlación lineal directa entre la rapidez del viento estimada y la observada (Lang, 2010).

2.5. Identificación de la distribución espacial de las emisiones provenientes de fuentes de combustión estacionarias locales y externas.

2.5.1 Inventario de emisiones para fuentes de combustión estacionarias locales.

Para el inventario de emisiones para fuentes de combustión estacionarias locales, solamente fueron consideradas las ocho centrales termoeléctricas (CTE) del Sistema Electro energético Nacional, a partir del Inventario de Emisiones de Contaminantes Atmosférico del Sector de Generación Energía Eléctrica (Turtós *et al.*, 2003; Turtós *et al.*, 2007; ONE, 2007), ajustadas al tiempo de operación de las plantas (o eventualidad), así como al Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero. Los resultados se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 2.5.1 Localización de las fuentes locales de emisión

CTE	Latitud (N)	Longitud (W)	Tasa de Emisión (g/s)	
			SO2	NOx
L1: Máximo Gómez	22°58'	-82 °45'	3109.45	119.75
L2: Este de La Habana	23°09'	-81°57'	2269.93	82.15
L3: Otto Parellada	23°07'	-82°21'	196.94	17.00
L4: Antonio Guiteras	23°02'	-81°34'	2533.92	96.27
L5: Carlos M. Céspedes	22°10'	-80°27'	1133.3	67.21
L6: 10 de Octubre	21°31'	-77°16'	2243.5	96.8
L7: FELTON Lidio R. Pérez	20°44'	-75°36'	2704.03	118.16
L8: Antonio Maceo	19°58'	-75°52'	1791.13	74.02

Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos de (Turtos et al., 2003; Turtós et al., 2007; ONE, 2007)

Tabla 2.5.2 Características tecnológicas de las fuentes locales de emisión

Identificación de la fuente	Altura de la fuente(m)	Temperatura de los gases (°K)	Diámetro interior de la fuente (m)	Velocidad de salida de los gases (m/s)
L1	56	413.0	5.5	11.3
L2	180	423.0	7.0	14.5
L3	46	443.0	4.6	6.0
L4	94	426.3	5.7	10.5
L5	100	392.9	6.0	6.2
L6	101	390.8	5.4	5.6
L7	116	436.9	6.5	14.6
L8	120	441.0	5.1	6.7

Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos de (Turtos et al., 2003; Turtós et al., 2007; ONE, 2007)

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%) (USEPA, 2010).

2.5.2 Inventario de emisiones para fuentes de combustión estacionarias externas

La información de las fuentes de combustión estacionarias externas fueron tomadas del Inventario Nacional de Emisiones Atmosféricas de los Estados Unidos (NEI, 2007), donde se seleccionaron las fuentes fijas de la generación eléctrica para 12 estados del sureste de los Estados Unidos, incluyéndose solamente las fuentes cuya ubicación geográfica pertenecen al del dominio del estudio, y que aparecen relacionados en la tabla que se presenta a continuación (USEPA, 2010):

Tabla 2.5.3 Estados del Sureste de los Estados Unidos

Nombre del Estado	Código de Identificación
Florida	FL
Alabama	AL
Mississippi	MS
Carolina del Sur	SC
Carolina del Norte	NC
Georgia	GA
Missouri	MO
Tennessee	TN
Virginia	VA
Virginia Occidental	WV
Kentucky	KY
Illinois	IL

Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos (US. EPA, 2010)

Fueron incluidas todas las fuentes con tasas de emisión anuales superiores a 1000 toneladas de (SO₂) y (NO_x) ajustadas al tiempo de operación de las mismas (eventualidad). Posteriormente para agrupar las fuentes dentro de la rejilla del estudio, se realizó un análisis estadístico descriptivo, aplicando una distribución de frecuencias para las variables latitud y longitud, respectivamente. Se construyeron 10 intervalos de frecuencia con amplitud de 2.30 grados de latitud Norte y 9 intervalos de frecuencias de amplitud 2.12 grados de longitud Oeste para cada uno de los 12 estados teniéndose en cuenta los extremos de las coordenadas geográficas en el dominio de estudio, y aparecen relacionadas en forma de tablas (Ver Anexo 2).

Se agruparon las fuentes individuales locales y externas dentro del dominio del estudio y se combinaron las marcas de clases y se obtuvieron un total de 28 puntos de rejilla distribuidos en el dominio del estudio, cuya distribución se muestra en la tabla 2.5.4.

Tabla 2.5.4 Distribución de frecuencia de las fuentes de emisión en el dominio del estudio

Lat / Lon	88°54	86°42	84°30	82°18	80°06	77°54	75°42
37°45	IL1	TN1,KY1	TN2,KY2	TN3,WV1,VA1,KY3	VA2	NC1,VA3	VA4
35°15	AL1	AL2	GA1	SC1	SC2,NC2		
32°45	MS1	AL3	GA2	SC3,GA3	SC4,GA4		
30°15	AL4,MS2	FL1	GA5	FL2			
27°45				FL3	FL4		
25°15					FL5		
22°45				L1	L2	L3	
20°15							L4

Finalmente se alcanzó la distribución en la rejilla de estudio que se muestra en las tablas 2.5.5 y 2.5.6, respectivamente.

Tabla 2.5.5 Distribución de los puntos de emisión en el dominio del estudio

Lat / Lon	88°54	86°42	84°30	82°18	80°06	77°54	75°42
37°45	P19	P20	P21	P22	P23	P24	P25
35°15	P1	P2	P3	P4	P5		
32°45	P6	P7	P8	P9	P10		
30°15	P11	P12	P13	P14			
27°45				P15	P16		
25°15					P17		
22°45				P18	P26	P27	
20°15							P28

Por último, para la representación de las emisiones totales de los contaminantes NO_x y SO₂ tratados en el estudio y se utilizó el software *ArcView_GIS_3.3*, generando las salidas cartográficas que se muestran posteriormente en el capítulo de resultados.

Tabla 2.5.6 Fuentes de emisión y sus características tecnológicas

No.	Lat	Lon	NO _x (g/s)	SO ₂ (g/s)	Altura (m)	Temp. (K)	Diam. (m)	Veloc. (m/s)
P1	35°15	-88°54	588.4	1256.2	222	409.5	7.9	30.6
P2	35°15	-86°42	39.1	180.3	91	445.9	4.6	17.3
P3	35.15	-84°30	103.2	206.4	267	414.6	7.0	21.6
P4	35°15	-82°18	423.8	847.6	95	434.2	3.8	21.3
P5	35°15	-80°06	421.6	843.3	90	414.9	4.5	23.8
P6	32°45	-88°54	13.6	20.4	107	427.6	5.3	22.3
P7	32°45	-86°42	1177.6	5785.5	167	458.6	6.7	15.7
P8	32°45	-84°30	199.3	398.7	228	397.0	6.7	22.0
P9	32°45	-82°18	136.3	272.7	173	459.3	6.0	20.7
P10	32°45	-80°06	2165.6	3432.5	88	553.4	5.4	23.4
P11	30.15	-88.54	35.4	1589.5	101	390.8	5.4	20.2
P12	30.15	-86.42	120.9	783.5	137	424.8	6.3	22.7
P13	30.15	-84.30	7.8	15.6	152	422.0	6.4	9.8
P14	30.15	-82.18	535.2	491.3	133	461.1	5.4	19.1
P15	27.45	-82.18	154.5	378.7	70	464.1	4.0	29.1
P16	27.45	-80.06	7805.5	13651.9	106	450.8	6.0	23.3
P17	25.15	-80.06	5393.5	9561.8	98	408.4	4.9	26.3
P18	22.45	-82.18	297.1	4758.0	94	426.3	5.7	10.5
P19	37.45	-88.54	374.7	1533.6	155	407.6	5.8	25.6
P20	37.45	-86.42	2516.0	3102.2	156	369.7	7.7	21.5
P21	37.45	-84.30	573.4	1108.0	213	420.7	9.2	32.7
P22	37.45	-82.18	1898.1	2196.4	170	421.5	6.7	22.2
P23	37.45	-80.06	61.5	209.6	137	394.3	4.4	23.7
P24	37.45	-77.54	204.6	683.1	85	392.9	4.7	20.8
P25	37.45	-75.42	89.5	350.1	86	405.9	4.9	26.4
P26	22.45	-80.06	40.3	680.0	100	392.9	6.0	6.2
P27	22.45	-77.54	58.08	1346.1	101	390.8	5.4	5.6
P28	20.15	-75.42	115.3	2697.1	118	438.6	2.6	6.8

2.6 Caracterización de la distribución espacial de los patrones meteorológicos en los periodos 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 periodo del estudio. Ambos objetivos permitieron asegurar resultados satisfactorios y estadísticamente significativos.

Para 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 sub-trayectorias de 24 horas. A partir de un 'gráfico tipo radial' se representaron las frecuencias acumuladas por cada dirección de las sub-trayectorias de 0-24 horas.

Una de las características de la contaminación atmosférica es su gran movilidad y que no respeta límites geopolíticos. La calidad del aire en una localidad, no solamente está influenciado por emisiones locales sino también por emisiones regionales y por las condiciones meteorológicas típicas.

En general, suele utilizarse un modelo para el cálculo de las trayectorias inversas, y tales estimaciones se realizan a partir de los campos de viento y los datos de presión registrados obteniéndose como salida final una representación gráfica del recorrido (o trayectoria) del flujo tridimensional aproximado de una masa de aire, donde las trayectorias descritas por las masas de aire tienen cambios significativos de dirección, a veces generándose bucles sobre ellos mismos.

En particular, se seleccionó a la localidad de Casablanca, La Habana, localizada en los 23.08 grados de latitud Norte y los -82.20 grados de longitud Oeste, situada en la isla de Cuba, rodeada del mar Caribe, a pesar de no tener límites geográficos terrestres con otro país, está sujeta a masas de aire que potencialmente trasladan contaminantes atmosféricos desde Norteamérica y Centroamérica, así como de otras zonas del territorio nacional.

La probabilidad de un impacto de una región vecina sobre la localidad de Casablanca, La Habana, es dependiente de la frecuencia de las trayectorias de masas de aire que viajan desde una región fuente potencial hacia esta localidad.

A continuación la investigación trata sobre la distribución de frecuencia de las direcciones de las trayectorias de las masas de aire que llegan a la localidad de Casablanca, La Habana, la cual ha brindado útiles resultados acerca de las regiones de Norteamérica y Centroamérica, que más frecuentemente afecta la calidad del aire en dicha localidad.

Para la confección de las rosas de concentraciones se emplearon las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 1980), estas comúnmente se emplean para la identificación de los orígenes de las fuentes emisoras potenciales. 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 (NOAA, 2010) y la clasificación de Tipos de Situaciones Sinópticas de masas de aire para Cuba (Lapinel, 1989) en el año 2007.

Los principales parámetros de la simulación del modelo HYSPLIT_4 se resumen en la Tabla 2.6.1. Para cada ejecución del modelo, una trayectoria inversa a 48 horas es adecuada para capturar el transporte potencial a largas distancias de contaminantes atmosféricos, particularmente considerando la mayoría de los contaminantes a ser depositados dentro de un par de días. Por ejemplo, el material particulado pueden depositarse en pocas horas o un día, y los compuestos NO_x y SO_x pueden viajar hasta tres o cuatro días (Seinfeld y Pandis, 2006).

Tabla 2.6.1 Los parámetros y propiedades utilizados para la ejecución del modelo HYSPLIT_4

Parámetros	Propiedades
Base de datos meteorológica Dirección de la trayectoria Tiempo total de ejecución (duración de la trayectoria) Punto de partida Hora de inicio	NCEP/NCAR 2.5 latitud-longitud 2007 Inversa (o regresiva) 48 horas Casablanca, La Habana 23.08 °N y 82.20 °O 00:00 UTC
Alturas de inicio	500 m a nivel de superficie (~954 hPa) 1000 a nivel de la superficie (~897 hPa) 1500 a nivel de la superficie (~750 hPa)

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 satélite meteorológicos y 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 lo tanto el catálogo de TSS seleccionado comprende 9 tipos principales y 20 subtipos.

Por último, se evaluaron las relaciones entre trayectorias inversas de 3 días (72 horas) con destino en la estación de Casablanca, Cuba, (Ver Anexo 4) y la clasificación de las masas de aire utilizando los Tipos de Situaciones Sinópticas (TSS) para el 2007 (Lapinel, 1989).

2.7 Caracterización del comportamiento de los flujos de concentraciones del contaminante (NO_x), y de la depositación ácida húmeda del nitrato (NO_3^-).

2.7.1 Generalidades del sistema CALMET/CALPUFF/CALPOST

El CALMET es utilizado para interpolar los datos de las observaciones existentes para crear, en detalle, campos de viento, la temperatura y predecir los parámetros de comportamiento de la capa límite tales como: la altura de mezcla, las clases de estabilidad y otros. Adicionalmente, el proceso de interpolación tiene en cuenta los efectos del terreno, flujos de pendiente y asegura que es preservada la continuidad de la masa de aire (Scire *et al.*, 2000a).

En el presente estudio, fueron utilizados los datos meteorológicos para el año 2007 a partir de 90 estaciones de aire superior y 91 estaciones de superficie para generar los campos meteorológicos diagnosticados. Las capas verticales fueron seleccionadas a las alturas de 0, 20, 110, 754, 1443, 2983, 4166 y 5521 metros para los niveles de presión mandatorios para una atmósfera estable 1000, 925, 850, 700, 600 y 500 hPa, respectivamente. Por su parte, la simulación con el módulo CALPUFF permite calcular las concentraciones de los compuestos gaseosos del nitrógeno (NO_x) y los flujos de deposición ácida húmeda del nitrato (NO_3^-) y la formación de ozono troposférico.

Las celdas que sólo contienen mar fueron consideradas sitios no receptores, y las restantes celdas de la rejilla, como sitios receptores. Esta consideración disminuye el tiempo de cálculo y no se cuentan con estaciones de monitoreo de la contaminación sobre la superficie marina, pero en un análisis posterior, es decir para un alcance mayor, podrían ser consideradas todas las celdas de la rejilla como sitios receptores, lo abre el camino a la realización de futuros estudios de evaluación de impacto sobre ecosistemas marinos y la calidad del aire en esas zonas.

Por su parte, el módulo CALPUFF utiliza un mecanismo químico que es consistente con el descrito en las referencias (Scire *et al.*, 2000b) los procesos químicos dentro del modelo, los valores de las velocidades de reacción y los parámetros que describen el proceso de deposición húmeda fueron extraídos de las referencias citadas (Scire *et al.*, 1984).

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 habitualmente con CALMET. Este calcula las estructuras de viento del área de estudio y CALPUFF calcula la dispersión de contaminantes en los sitios receptores, tomando en cuenta campos de viento tridimensionales complejos, lo cual es particularmente importante para las fuentes emisoras ubicadas en áreas costeras.

El módulo CALPUFF, calcula las concentraciones en los receptores distribuidos en el dominio de estudio, a diferentes horas, por ejemplo, el dióxido de azufre (SO_2) y las especies de la

familia del nitrógeno (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 (SO_4^{-2}) y los nitratos (NO_3^-), que han tomado 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 (Levy, et al., 2002; López, et al., 2007).

El módulo CALPUFF requiere del CALMET como pre-procesador meteorológico para desplegar al máximo todas sus potencialidades. De manera general; CALMET es un módulo meteorológico de diagnóstico que permite generar en una rejilla tridimensional (como máximo 265 x 265 píxeles de resolución) los campos meteorológicos horarios de temperatura y viento en el dominio de modelación; además incluye campos bidimensionales asociados como la altura de mezcla, características de la superficie y propiedades de la dispersión (en detalle ver Anexo 5).

El módulo CALMET calcula campos de vientos y temperatura horarios (en forma de rejilla tridimensional) para un dominio objeto de modelación, a su vez, éste se alimenta de pre-procesadores de datos meteorológicos y geofísicos globales, por ejemplo: del MAKEGEO, del NNR, etc.

Por su parte el módulo CALPUFF es de tipo gaussiano, *puff* (o bocanada) integrado no estacionario, lagrangiano, adoptado por la *US. EPA* como guía sobre modelos de calidad del aire para evaluar transporte de contaminantes en un amplio rango espacial relacionado a condiciones meteorológicas complejas.

Ahora bien, el módulo CALPUFF permite calcular la dispersión y transporte de bocanadas (o *puff*) de material emitido desde fuentes modeladas así como, simula los procesos de transformación y depositación durante la trayectoria recorrida por dichas bocanadas. Para esto CALPUFF utiliza generalmente los campos generados por CALMET. Las variaciones espaciales y temporales de los campos meteorológicos seleccionados se incorporan explícitamente en la distribución de las bocanadas, resultado del modelo de transporte, durante un período de simulación.

Los archivos de salida primarios de CALPUFF contienen los flujos de concentraciones y depositaciones 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 produciendo tablas que resumen los resultados de la simulación.

El módulo CALPUFF utiliza dos tipos de modelos para garantizar una adecuada cobertura de los *puff*. El primer método utiliza *puff* radialmente simétricos (en forma de esferas) mientras que el otro utiliza *puff* no circulares que se alargan en la dirección del viento (*slug*), en este estudio se utilizó el tipo *puff*.

Los datos de aire superior, por la no disponibilidad de estos, se usaron las salidas del NNR (UP.DAT).

Las tasas de precipitaciones horarias, estas son extraídas de los archivos de datos meteorológicos de superficie fueron extraídas del NRR y pre procesados con un programa específico en lenguaje Visual Basic de MS Excel para generar el archivo PRECIP.DAT y otro similar para generar el archivo de control de CALMET (CALMET.INP).

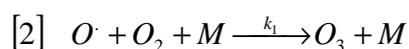
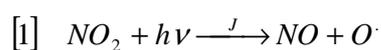
El módulo CALPOST realiza el posprocesamiento gráfico de las salidas del módulo CALPUFF, el cual permite interfaz con otros software graficadores, desde dentro (utilitarios *CALView*, *SurfSizer* y *SurfExporter*) y fuera del sistema de modelación *CALPro*, muy conocidos en el mercado como el SURFER versión 8 y superior, cuyos resultados pueden verse en el capítulo siguiente de resultados.

2.8 Formación de ozono troposférico

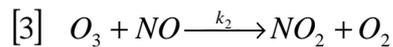
El cálculo de las concentraciones del ozono troposférico se realizó a partir de un modelo estático (Euleriano) que utiliza como datos de entrada, los flujos de las concentraciones de NO₂ y NO bajo condiciones meteorológicas especiales y el valor de la radiación del punto geográfico de interés, el cual es descrito a continuación:

2.8.1 Principios básicos

La base de la formación de ozono es la fotólisis del dióxido de nitrógeno (NO₂), por las siguientes reacciones (Seinfeld, 1986):



Donde $h\nu$ representa la energía fotoquímica proveniente de la radiación ultravioleta (o un fotón), k representa la constante de fotólisis de la reacción del NO_2 y $h\nu$ y M representa N_2 o O_2 u otra molécula que absorba la energía excedente de la reacción. Una vez formado el ozono es rápidamente disociado por la reacción, como sigue:



La molécula de 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 concentración de ozono puede estimarse por la siguiente relación:

$$[\text{O}_3] = \frac{J}{k_2} \frac{[\text{NO}_2]}{[\text{NO}]} \quad (\text{Ecuación 9})$$

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 compuestos orgánicos volátiles (COV) son un contribuidor fundamental para las concentraciones de ozono por encima de los valores normales de fondo. La mayoría de las emisiones de combustión y biogénica de óxidos de nitrógeno son emitidas en la forma de NO , aunque algunas de los NO en la combustión de gases son oxidados a NO_2 . En la atmósfera, los COV facilitan la oxidación del NO a NO_2 , permitiendo así la producción continua de ozono mientras reduciendo la destrucción de ozono por el NO .

Las fuentes de COV son de origen natural y antropogénica. Las fuentes antropogénicas incluyen a los automóviles, la producción química, y otras actividades industriales. Muchas especies de vegetación incluyendo árboles y plantas emiten naturalmente COV. En la troposfera natural, existe una cantidad suficiente de COV naturales (o biogénico) para oxidar el NO a NO_2 , el cual resulta en la concentración de ozono de fondo discutido arriba. Cuando COV adicionales son añadidos a la atmósfera, una proporción mayor del NO es oxidado a NO_2 , resultando una mayor formación de ozono. Adicionalmente, las fuentes antropogénicas de NO , incluyendo fuentes tales como automóviles y plantas de generación eléctrica, resultan en mayores niveles de NO_2 en la atmósfera, las cuales están disponibles para la fotólisis a NO y O (un átomo de oxígeno) y, finalmente, en NO y ozono.

2.8.2 Los diversos factores que gobiernan la química troposférica

Las emisiones de precursores, la dilución, el transporte, las reacciones químicas, el estado físico de la atmósfera forman un complejo que regula los cambios observados.

El papel de la parte del espectro de la radiación UV

Cuando la radiación del sol pasa a través de la atmósfera. Se modifica en intensidad y distribución espectral de la absorción, reflexión y difusión, por lo que la presencia de nubes, el albedo de la tierra, la presencia de aerosoles, el valor del ángulo cenital de energía solar de longitud de onda inferior a 290 nm llega al suelo. La proporción de la radiación UV en el suelo es baja (menos del 10%), pero los fotones UV pueden causar reacciones en la materia fotolítica y fotoquímica.

Tres factores determinan la tasa o **constante de fotolisis** de una especie química en la atmósfera:

- El **flujo actínico** o número de fotones que pasa a través de un área en el tiempo y que es dependiente de la longitud de onda, el ángulo cenital, la altitud, el albedo, las nubes, etc., expresado en unidades de **fotones $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{nm}^{-1}$** ;
- La **sección eficaz** o capacidad de las especies de absorber fotones, en **$\text{cm}^{-2} \text{molécula}^{-1}$** ; y
- 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:

$$J_t = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \sigma(\lambda) \cdot \phi(\lambda) \cdot F(\lambda, t) d\lambda \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde:

$\sigma(\lambda)$: Sección eficaz ($\text{cm}^{-2} \text{molécula}^{-1}$)

$\phi(\lambda)$: Rendimiento cuántico

$F(\lambda, t)$: Flujo actínico ($\text{fotones} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

Los valores de sección eficaz $\sigma(\lambda)$ y rendimiento cuántico $\phi(\lambda)$ se obtuvieron directamente de Seinfeld and Pandis, 2006. Es decir, que el área bajo la curva es el producto: (flujo de fotones) x (sección eficaz) x (rendimiento cuántico) frente a longitud de onda, expresada en unidades de tiempo⁻¹.

Las principales reacciones fotolíticas de la química de la troposfera y por rangos de longitudes de onda se describen en la Tabla 2.8.1.

Tabla 2.8.1 Reacciones fotolíticas asociadas a rangos de longitudes de onda

[1]	$\text{NO}_2 + h\nu$	→	$\text{NO} + \text{O}^\bullet$	(290 nm <λ<430 nm)
[2]	$\text{HNO}_2 + h\nu$	→	$\text{OH} + \text{NO}$	(290 nm <λ<400 nm)
[3]	$\text{HCO} + h\nu$	→	$\text{H}_2 + \text{CO}$	(290 nm <λ<370 nm)
		→	$\text{H} + \text{HCHO}$	
[4]	$\text{H}_2\text{O}_2 + h\nu$	→	2OH	(290 nm <λ<360 nm)
[5]	$\text{RCHO} + h\nu$	→	$\text{R} + \text{CHO}$	(290 nm <λ<345 nm)
		→	$\text{RH} + \text{CO}$	
[6]	$\text{R-C(O)-R}' + h\nu$	→	$\text{R-CO} + \text{R}'$	(290 nm <λ<330 nm)
		→	$\text{R} + \text{R}'\text{-CO}$	
[7]	$\text{O}_3 + h\nu$	→	$\text{O} (1\text{D}) + \text{O}_2$	(290 nm <λ<320 nm)
[8]	$\text{O}_3 + h\nu$	→	$\text{O} (3\text{D}) + \text{O}_2$	(290 nm <λ<300 nm)

Fuente: Elaboración propia en base a Dechaux (1989)

2.8.1 Algoritmo para calcular las concentraciones de ozono troposférico

En el procedimiento de cálculo se siguieron los siguientes pasos:

Paso 1) Se seleccionaron los meses con condiciones meteorológicas favorables para la formación de ozono troposférico para el dominio y periodo del presente estudio.

Para la selección de los días dentro de los meses se consideran los siguientes incisos:

- 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 (Sudeste de los Estados Unidos);
- b) Según (US. EPA, 1998) la formación de ozono troposférico es favorable bajo condiciones meteorológicas especiales: influencia de sistemas de altas presiones a escala sinóptica, días cálidos, secos, despejados y de vientos débiles. Por tal motivo, se exploró la Base de Datos Meteorológicas de la estación Casablanca en las variables de interés (dirección del viento (en grados), nubosidad (en octavos), precipitación (mm) para la selección de los días;
- c) Explorar la Base de datos de la clasificación de Tipos de Situaciones Sinópticas (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 radiativa TUV Model del NCAR (Madronich, 1987); http://cprm.acd.ucar.edu/Models/TUV/Interactive_TUV.

Previamente se tomaron los datos de ozono total (expresado en unidades Dobson) de la columna vertical de la atmósfera medidos por el satélite TOMS para los meses de febrero, abril y noviembre del 2007, como uno de los datos de entrada al modelo TUV para la localidad de Casablanca. <ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/data/ozone/Y2007>.

Solamente consideraremos las horas sol desde las 7:00 (12:00 GMT) hasta las 17:00 horas (22:00 GMT) y para las longitudes de onda a considerar son las del espectro del Visible Ultravioleta A y B que va desde los 273,97 a 422,5 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 solamente para los meses seleccionados en el paso 2), cambiando el mecanismo químico (MESOPUFF II a RIVAD/ARM3), considerando estos dos nuevos puntos receptores para obtener las concentraciones de NO₂ y NO, respectivamente.

Paso 5) Se obtuvieron las concentraciones de ozono por la implementación del modelo descrito por la ecuación [9]), a través de una planilla Microsoft Excel 97 para facilitar los cálculos.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

3.1 Distribución espacial de las emisiones provenientes de fuentes locales y externas

La distribución espacial de las emisiones estudiadas provenientes de fuentes locales se pueden observar en las Figuras 3.1.1 y 3.1.2. Para las fuentes externas (detalle en Anexo 3) solamente se consideró la parte Sudeste de los Estados Unidos.

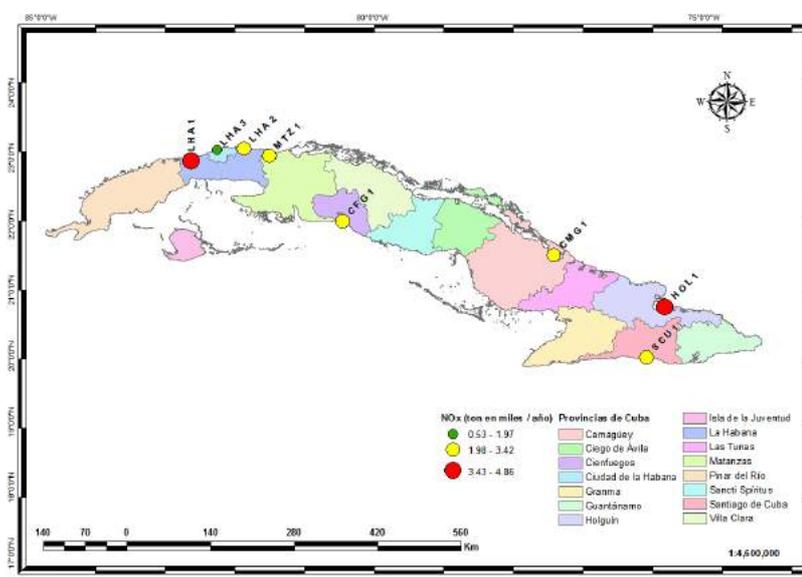


Figura 3.1.1. Distribución de las emisiones de NO_x provenientes de fuentes locales, CTE, Cuba

En la Figura 3.1.1 se observa que las mayores emisiones de precursores gaseosos NO_x provienen de las termoeléctricas Mariel que se localiza en la costa norte de la provincia La Habana y la Felton ubicada en el norte de la provincia de Holguín, respectivamente. Además, ambas fuentes locales de emisiones contribuyen al 35,4% del balance total del inventario de emisiones de NO_x realizado en el estudio y aproximadamente el 9% al balance total del Inventario Nacional de Emisiones y Remociones de Gases de Invernadero para Cuba.

Por otra parte, la Figura 3.1.2 muestra las emisiones de SO₂ provenientes de las fuentes locales (termoeléctricas) distribuidas a lo largo del territorio nacional, destacándose la Felton y Mariel nuevamente entre las termoeléctricas con emisiones mayores al igual que la Antonio

Guiteras ubicada en la provincia de Matanzas y las cuales contribuyen al 51,3% del balance total del inventario de emisiones de SO₂ realizado en el estudio y el 40,2 % del balance total Nacional (López et al., 2009).

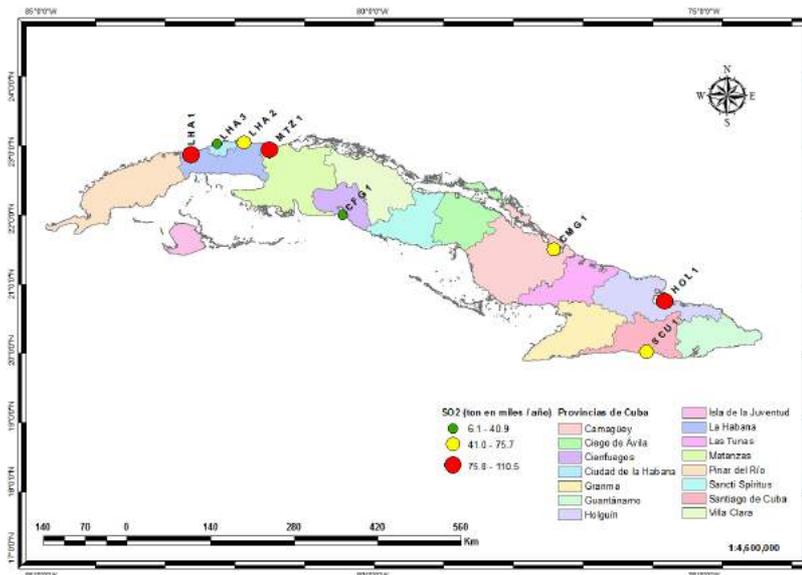


Figura 3.1.2. Distribución de las emisiones de SO₂ proveniente de las fuentes locales, CTE, Cuba.

3.2 Análisis de las trayectorias inversas

3.2.1 Simulaciones con el modelo de trayectorias HYSPLIT versión 4.

La Figura 3.2.1 muestra (en el lado izquierdo) la distribución Anual de las trayectorias inversas de masas de aire, el 23,7 % que llegan a Casablanca, La Habana en 2007 provienen del Noreste (NE), lo que 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 el lado derecho de la Figura 3.2.1 aparece representada la distribución de las trayectorias inversas de masas de aire durante los periodos poco lluvioso (Noviembre-Abril) y lluvioso (Mayo-October) del año 2007, se muestra una mayor frecuencia de ocurrencia de las contribuciones provenientes de fuentes de emisiones externas en el periodo poco lluvioso alcanzándose 31,7% contra un 10,6% para el periodo poco lluvioso, mientras que la mayor contribución desde fuentes de emisiones locales ocurren durante el periodo lluvioso con un 17,8% en contraste con solamente un 8,5% en el periodo poco lluvioso, hay que señalar que los

porcentajes que aparecen en la categoría otras fuentes, corresponden a las fuentes de emisiones externas que no fueron utilizadas en el inventario de emisiones realizado en el estudio.

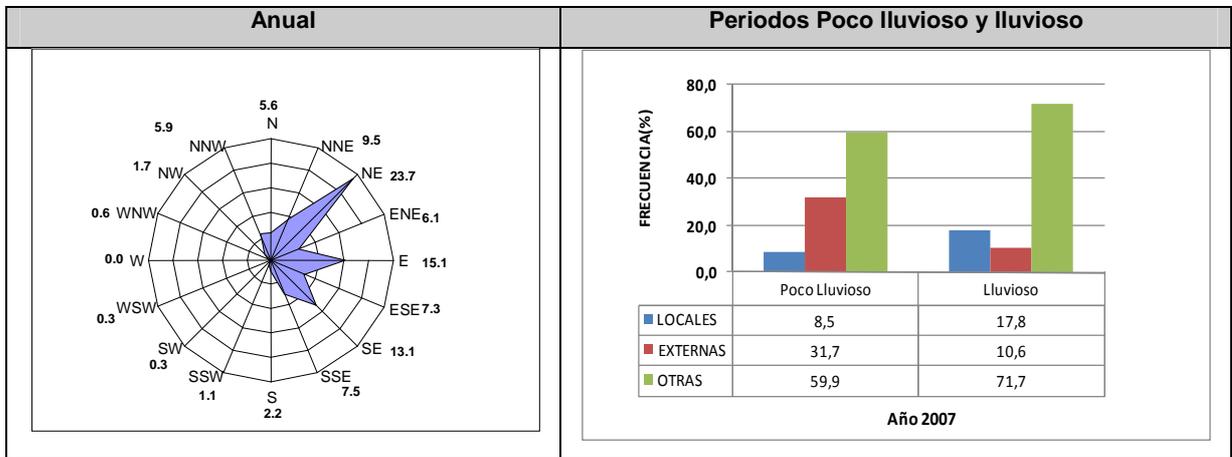


Figura 3.2.1 Distribución de Frecuencia de las trayectorias inversas de las masas de aire. Casablanca, La Habana, 2007.

En las Figura 3.2.2, que las mayores contribuciones provenientes de las fuentes locales (representada por la línea de color rojo) se alcanzaron durante los meses de febrero (49,9%), seguido por noviembre (47,6 %) y abril con un (30 %), respectivamente.

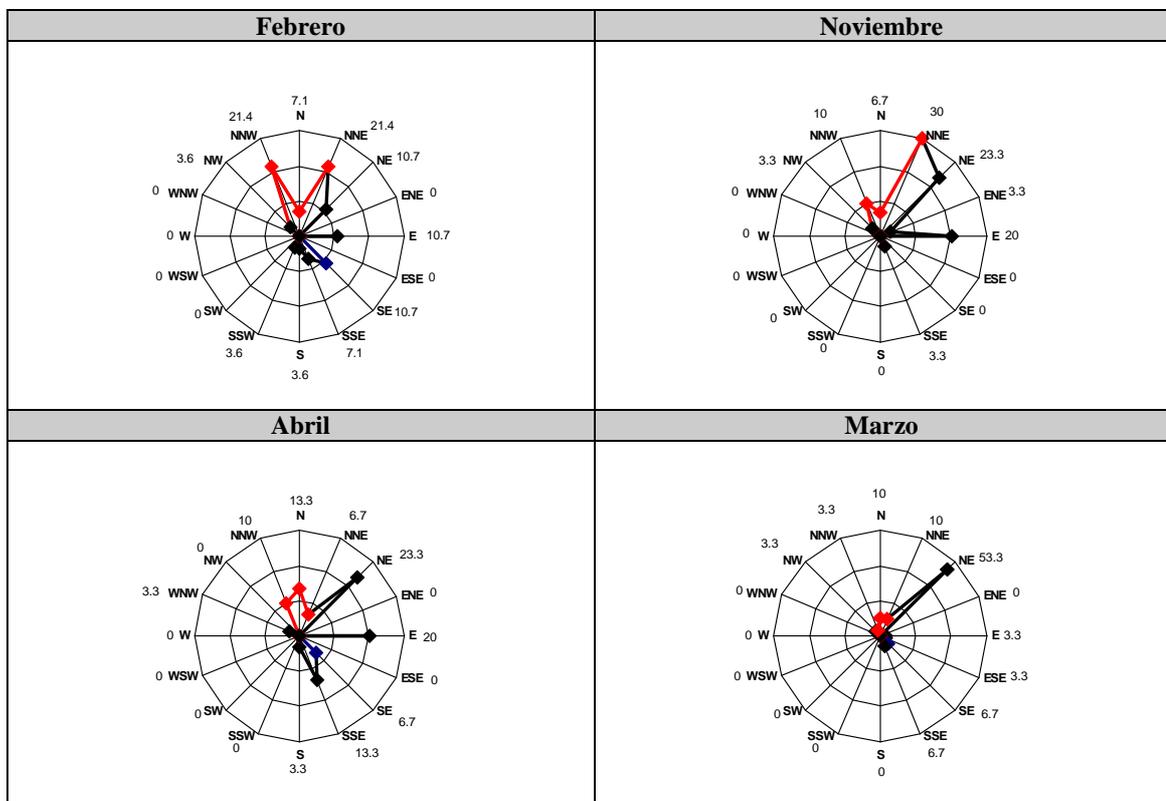


Figura 3.2.2 Distribución de Frecuencia de las trayectorias inversas de las masas de aire. Casablanca, La Habana, 2007.

Por lo tanto, para el análisis de la relación entre los Tipos de Situaciones Sinópticas (Lapinel, 1989) y las trayectorias inversas de masas de aire, se ha dividido el año 2007 en los periodos anteriormente mencionados.

Por su parte, como se observa en las Figura 3.2.3, que las mayores contribuciones provenientes de las fuentes locales (representada por la línea de color azul) se alcanzaron durante los meses octubre (30%), seguido por agosto (26,7%), julio (16,7%) y septiembre con un (13,3 %), respectivamente.

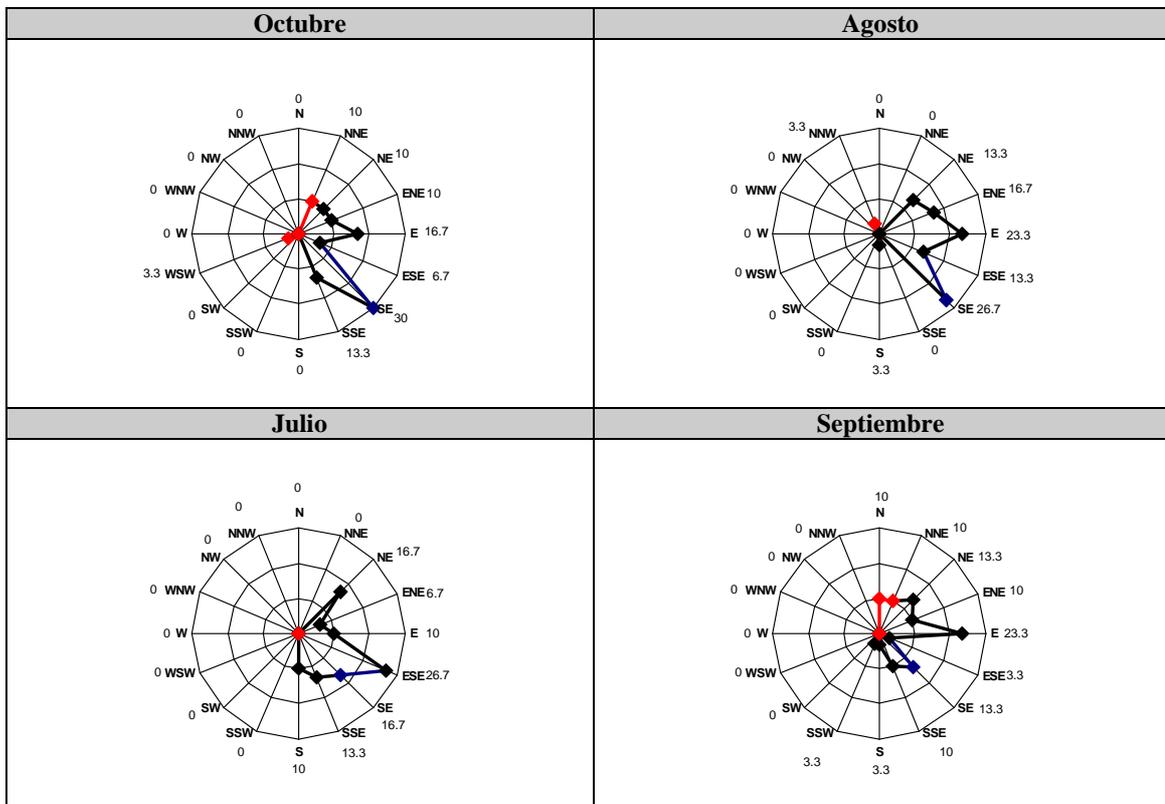


Figura 3.2.3 Distribución de Frecuencia de las trayectorias inversas de las masas de aire. Casablanca, La Habana, 2007.

Como se observa en la Figura. 3.2.4 para el periodo lluvioso del año (Mayo-Octubre) hubo un predominio del TSS Tipo V a.) 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 17,8% en todo el periodo, 2007.

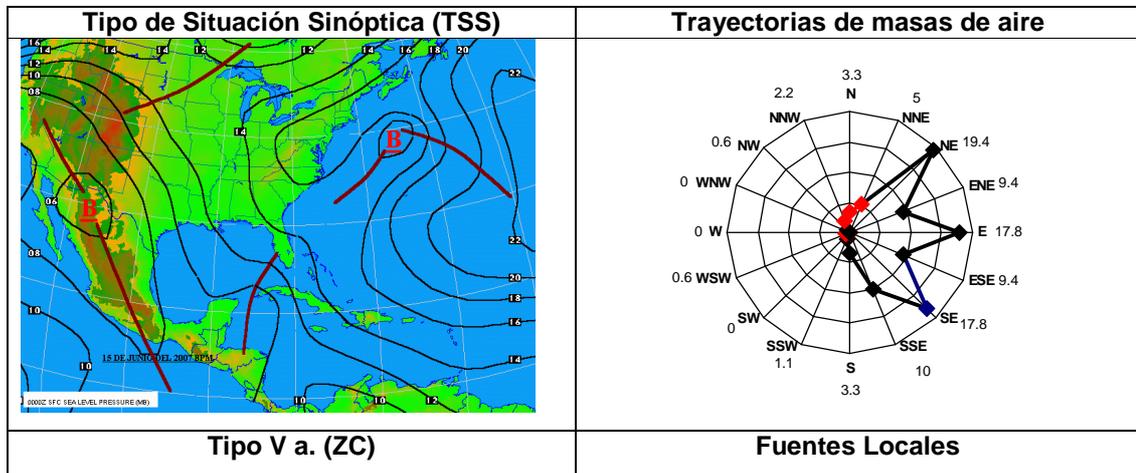


Figura 3.2.4. Relación entre TSS y las trayectorias de masas de aire. Casablanca. Periodo Lluvioso/ 2007.

Por su parte, durante el periodo lluvioso se encontraron condiciones sinópticas típicas diferentes para los meses de mayo y julio. Como se muestra en la Figura 3.2.5, en el mes de mayo hubo predominio del Tipo III Gradiente débil (GD) y para julio fue el Tipo I .b) (AA) asociados con vientos del segundo cuadrante, respectivamente.

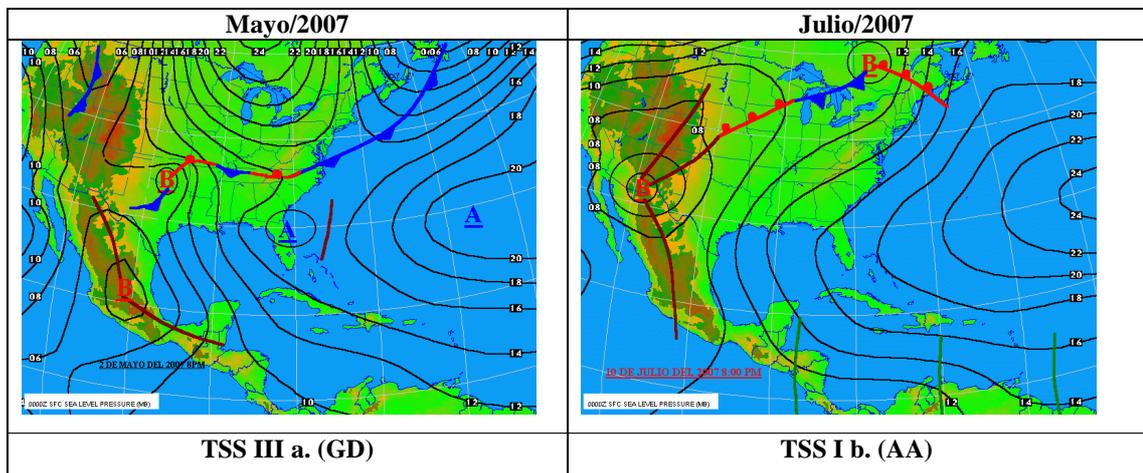


Figura 3.2.5. TSS predominante para los meses de Mayo y Julio. Periodo Lluvioso/ 2007.

Mientras que en el periodo poco lluvioso (Noviembre-Abril), como muestra la Figura 3.2.6, se observa un predominio del TSS Tipo VIII a) y b) (AM), altas polares típicas, que producen subsidencia del aire polar tienden a desplazarse del Sudeste y hacia el Este dejando sobre el territorio bajas temperaturas y vientos de componente Norte, asociadas a 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 VII c.) Frente Frío Estacionario (FEE), Figura 3.2.7.

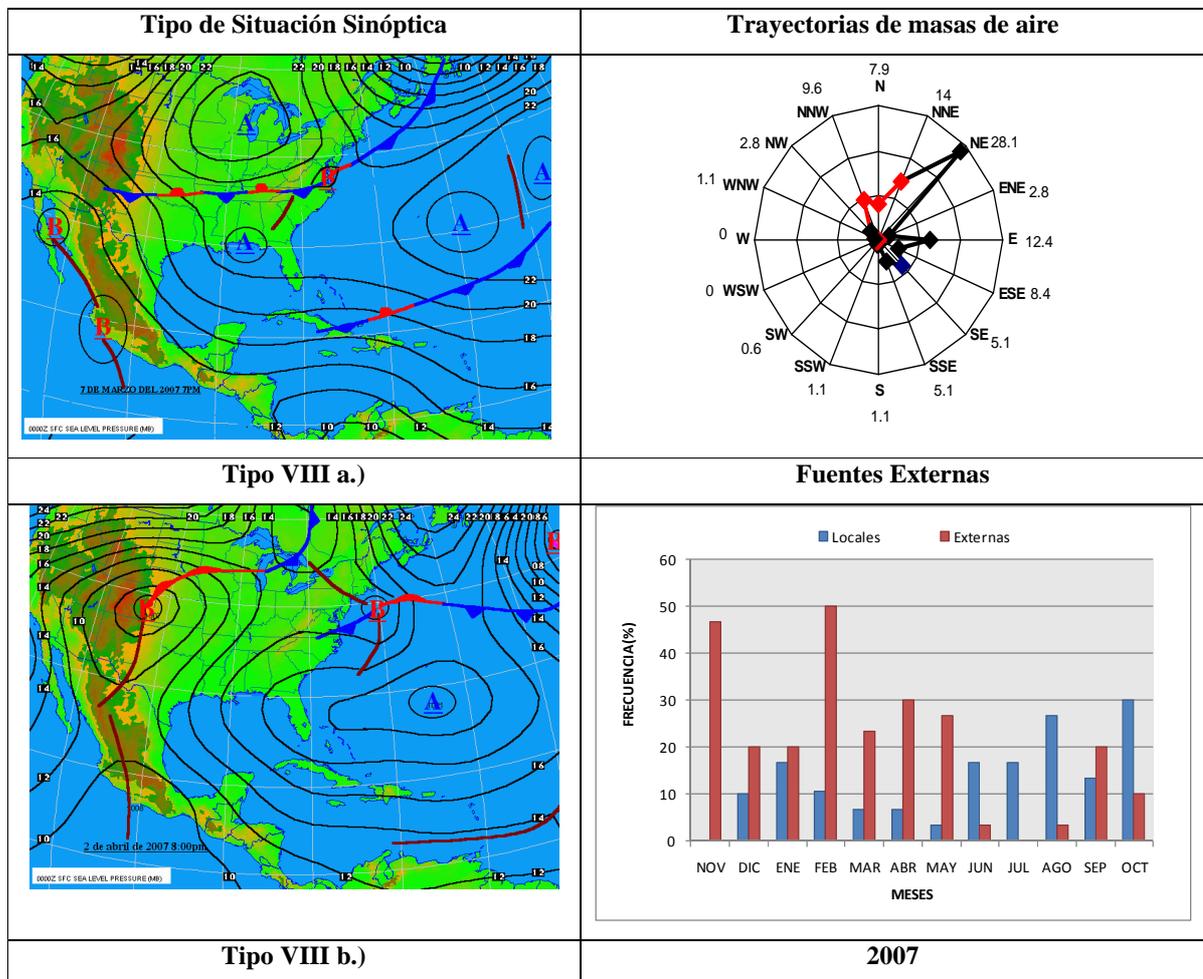


Figura 3.2.6 Relación entre TSS y las trayectorias de masas de aire. Casablanca. Periodo Poco Lluvioso/ 2007.

Se abordaron la mayoría de los patrones de transporte de masas de aire y su relación con la influencia de sistemas sinópticos tales como el anticiclón semi permanente Azores Bermuda y Continental, y otros sistemas originados en latitudes medias como los frentes fríos, así como los ciclones tropicales que se originan en el Caribe Occidental y Oriental. Cada ejecución del modelo (o día simulado) generó un gráfico de las trayectorias inversas de masas de aire que llegaron a la localidad de Casablanca, La Habana. Un catálogo sobre las salidas gráficas de la ejecución del modelo HYSPLIT_4, aparecen en el Anexo 4.

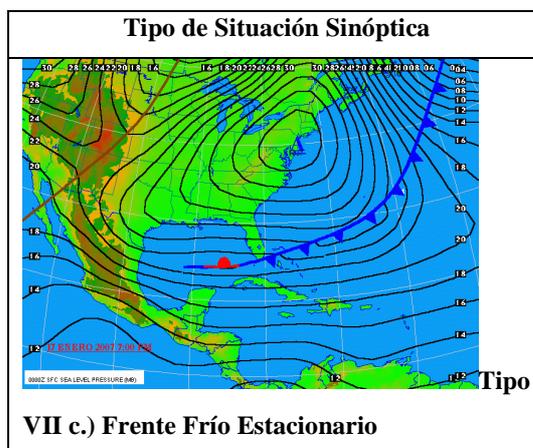


Figura 3.2.7. TSS predominante para los meses de Enero y Febrero. Periodo Poco Lluvioso/ 2007. Fuente: INSMET, 2007

3.3 Resultados de la Modelación del transporte y depositación de los contaminantes atmosféricos

3.3.1 Comportamiento de las concentraciones de NO_x obtenidos por el modelo CALPUFF

Las Figuras 3.3.1.1 y 3.3.1.2 muestran los resultados del comportamiento de las concentraciones promedio horaria mensual del NO_x en la localidad rural de Falla, Ciego de Ávila, Cuba para los periodo poco lluvioso y lluvioso del año 2007, respectivamente. En general, los valores de las concentraciones estimadas de NO_x 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 madrugada y en la noche por una mayor acumulación de los contaminantes y predominio de vientos débiles y calma (Cuesta, 1995; Cuesta *et al.*, 2000), mientras que los valores mínimos absolutos se alcanzan en las horas del mediodía, debido a una mayor dispersión de este contaminante. Por su parte, para el periodo lluvioso del año, las concentraciones de NO_x se muestran en la figura 3.3.1.2.

La diferencia en los valores mínimos mayores en el periodo lluvioso se justifica debido a que ocurren los valores casi nulos debido a la limpieza de la atmósfera por las lluvias conectivas típicas del verano (periodo lluvioso) en las latitudes tropicales. Por otra parte, en estos meses es cuando existe una alta frecuencia de contribuciones desde las fuentes locales y otras externas cuyas emisiones no se cuantificaron en el presente estudio.

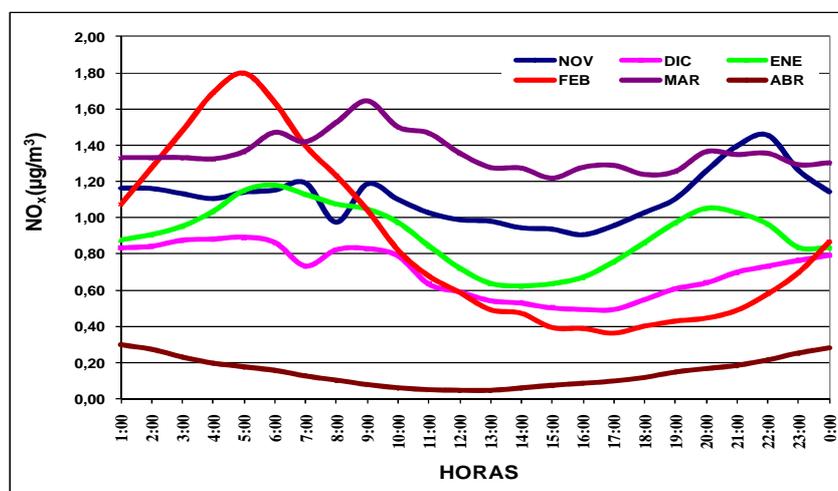


Figura 3.3.1.1 Comportamiento promedio horario mensual de las concentraciones de NO_x en la localidad de Falla, para el periodo Poco Lluvioso de 2007.

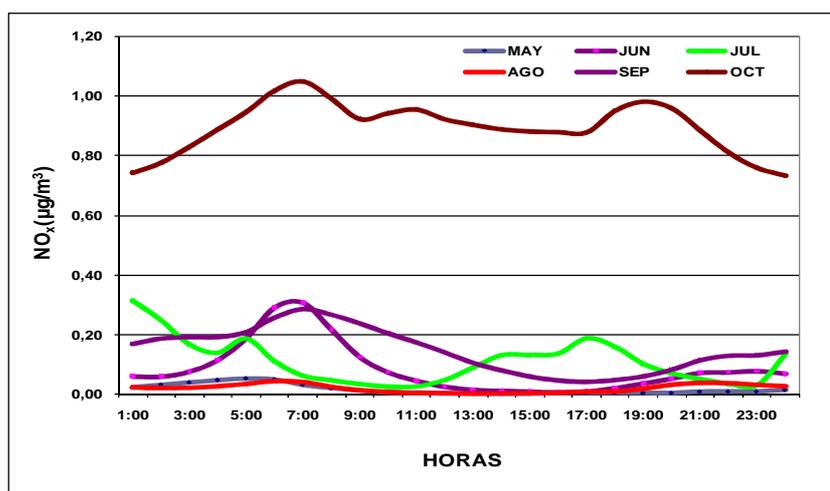


Figura 3.3.1.2 Comportamiento promedio horario mensual de las concentraciones de NO_x en la localidad de Falla, para el periodo Lluvioso de 2007.

Al comparar las concentraciones de (NO_x) a partir de la simulación con CALPUFF con los valores promedios mensuales históricos para el periodo desde 1985 hasta el 2006 medidos en la estación de Falla (Figura 3.3.1.3), existe una mejor correspondencia entre los valores alcanzados en el periodo poco lluvioso que en el periodo lluvioso, en donde el modelo tiende a subestimar los valores de las concentraciones.

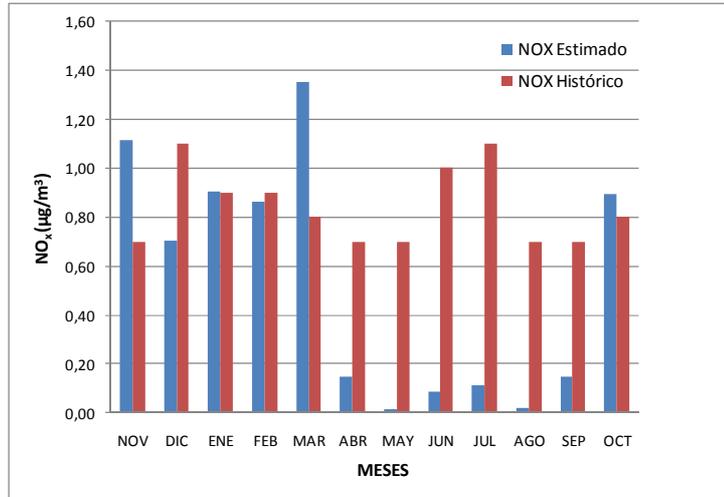


Figura 3.3.1.3 Comportamiento promedio horario mensual de las concentraciones de NOx en la localidad de Falla, 2007.

Se realizó una corrección a los valores de las concentraciones de NO_x para el periodo lluvioso teniéndose en cuenta el volumen total de las emisiones de NO_x del Inventario de Emisiones realizado en este estudio (ETAPA I), que valor es 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 solamente se consideró la mitad del año, entonces el volumen de emisiones de NO_x total e inventariado se reduce a la mitad, 41,58 y 10,8 Gg/año, respectivamente. Se deduce que:

$$FI = \frac{10,8}{41,58} = 0,26$$

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

$$C_{ec} = \frac{(FI * C_h + (1 - FI) * C_e)}{2 * FI} \quad \text{Ecuación (11)}$$

Donde

C_{ec}: Valor de la concentración de NO_x estimada corregida;

FI: es la Fracción del volumen de emisión total de NO_x en el Inventario del estudio;

C_h: Valor de la concentración de NO_x histórica medida; y

C_e: Valor de la concentración de NO_x estimada

La Figura 3.3.1.4 muestra el comportamiento de las concentraciones estimadas corregidas para el periodo lluvioso aplicando la ecuación (11).

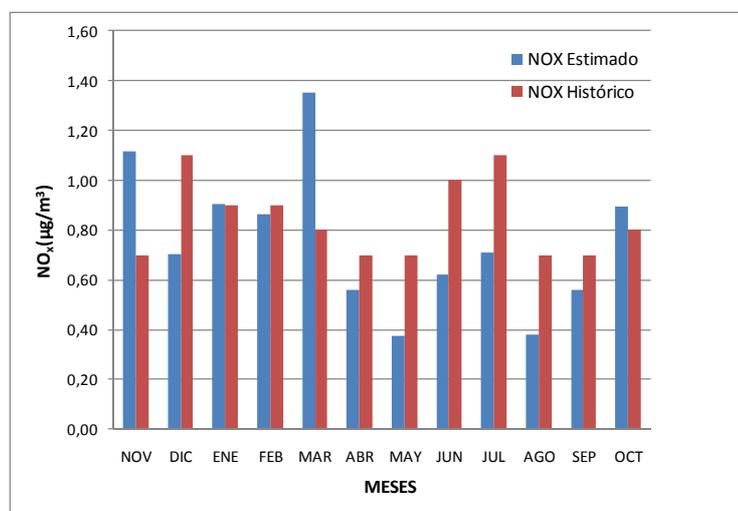


Figura 3.3.1.4 Comportamiento promedio horario mensual de las concentraciones de NOx en la localidad de Falla, 2007. Corregida para el periodo lluvioso.

En la presente estudio, los valores medios mensuales concentraciones de NO₂ de las en las principales estaciones de muestreo se encuentran entre 0,02 y 1,35 µg/m³ y los que coinciden con los informados por estudios realizados en zonas rurales de Australia (Ayers *et al.*, 1995; Rodriguez *et al.*, 2011), alcanzando valores promedios anuales para el NO_x entre 1,6 – 2,8 µg/m³. Estas estaciones rurales no presentan un ciclo estacional evidente. Mientras que las estaciones que tienen cierta influencia urbana presentan concentraciones entre 2 y 4 veces mayores y un ciclo estacional donde ocurren las máximas concentraciones en el invierno.

En el trópico el comportamiento regional de las fuentes de los óxidos de nitrógeno es menos intenso que el provocado por la quema de los combustibles fósiles en las latitudes medias. Siendo las fuentes principales la quema de la biomasa, la actividad biológica de los suelos y las descargas eléctricas (Logan, 1983; Cuesta, 1995; Ponce-Mendoza *et al.*, 2006; Ridley *et al.*, 2004).

Mediciones en áreas rurales muestran valores medios en superficie desde 0,3 a 20,3 µg/m³ en los Estados Unidos (Leiming *et al.*, 2008), pero se aprecia que las concentraciones en las localidades más cercanas a las ciudades son mayores (Winston *et al.*, 2010). Resultados similares para Inglaterra y Japón fueron obtenidos en zonas rurales (Lynette y Jenkin, 2001). En Suecia para localidades alejadas de fuentes contaminantes oscilan entre 1,3 y 6,8 µg/m³ (Hinrichsen, 1988).

3.3.2 Comportamiento de la distribución espacial y temporal de la deposición ácida húmeda del Nitrato a partir de las salidas de CALPUFF

La distribución espacial diaria del depósito húmedo del nitrato obtenidos 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 periodo poco lluvioso (Abril-Noviembre), como se observa en la Figura 3.3.2.1, los valores de las depositaciones promedio diarias se encuentran en el rango de 30 a 45 ng-NO₃⁻/m² a pesar de ser más bajas que las obtenidas en el periodo lluvioso, es importante señalar que su distribución espacial, en el caso del evento individual del 13 de febrero, coincide con zonas sector costero norte de la provincia de Holguín donde se encuentra la explotación minera de níquel, y además este sector abarca también el complejo industrial portuario de la provincia de Camagüey (Nuevitás), lo que verifica lo informado que existe una contribución antropogénico local al proceso de acidez sobre el territorio nacional (López et al., 1999). Mientras que en el caso del 22 de abril se observa una mayor contribución de las fuentes externas como se puede apreciar en el mapa de trayectorias inversas, y aparecen las mayores tasas de deposición húmeda de nitrato afectando la costa norte occidental de Cuba.

La variación estacional de los flujos diarios de depósito húmedo de nitrato se relaciona con las trayectorias de masas de aire y los TSS predominantes (condiciones meteorológicas favorables) en los eventos individuales representados. En los meses lluviosos, las áreas de depósitos de nitrato son más pequeñas, tanto que apenas alcanzan unas decenas de kilómetros en superficie y en localidades dispersas por el dominio que las que se alcanzan para el periodo lluvioso donde superan a los cientos de kilómetros y aparecen como zonas de mayor deposición (Geertsema y Schreur, 2009).

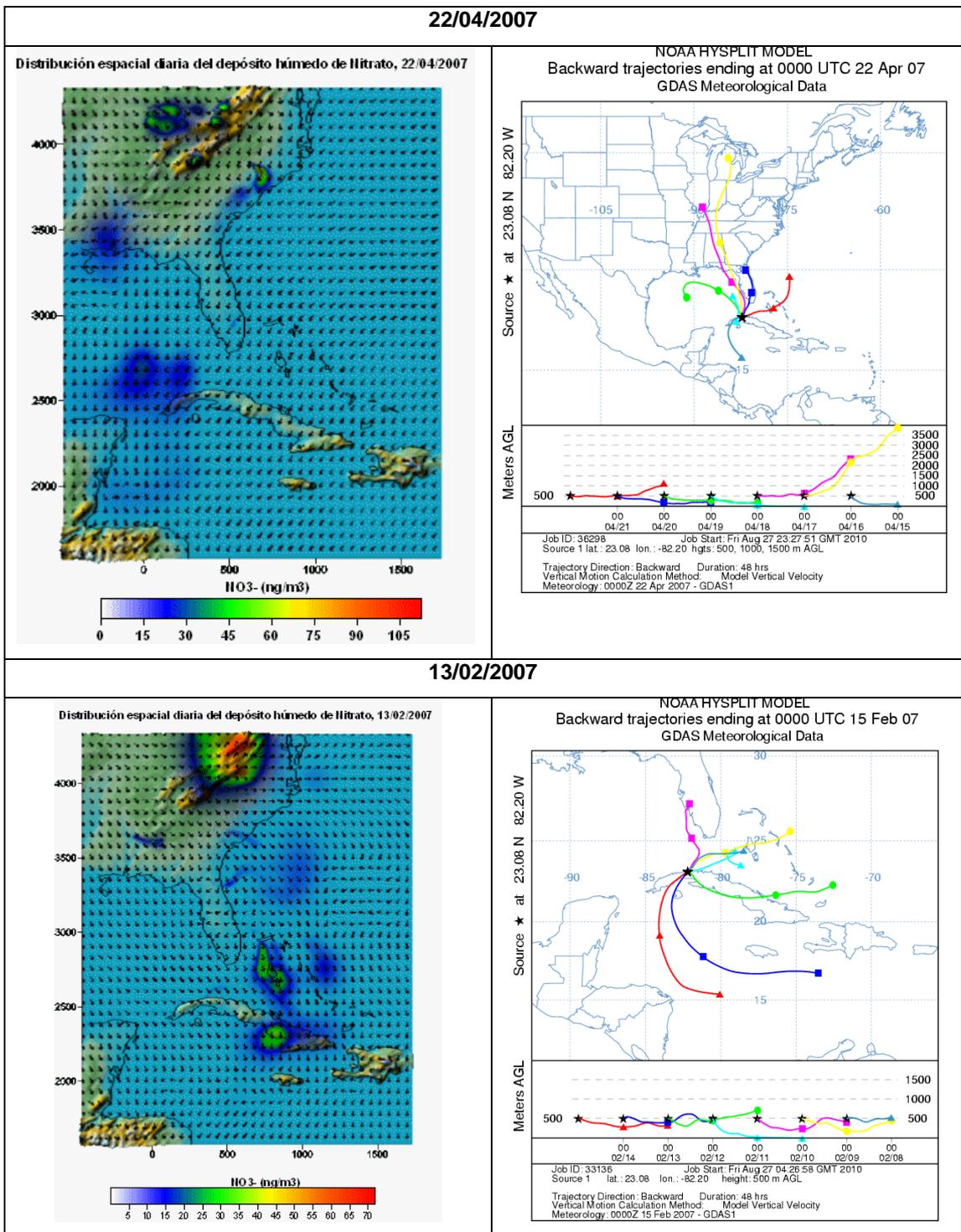


Figura 3.3.2.1 Flujo diario promedio de los depósitos húmedos de nitrato asociado a las trayectorias inversas de masas de aire para el periodo poco lluvioso. Fuente: Elaboración propia a partir de Draxler et al. (2009)

Por su parte, se relacionó la distribución espacial diaria del depósito húmedo del nitrato (NO_3^-), obtenidos 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 periodo lluvioso (Mayo-Octubre), como se puede observar en la Figura 3.3.2.2.

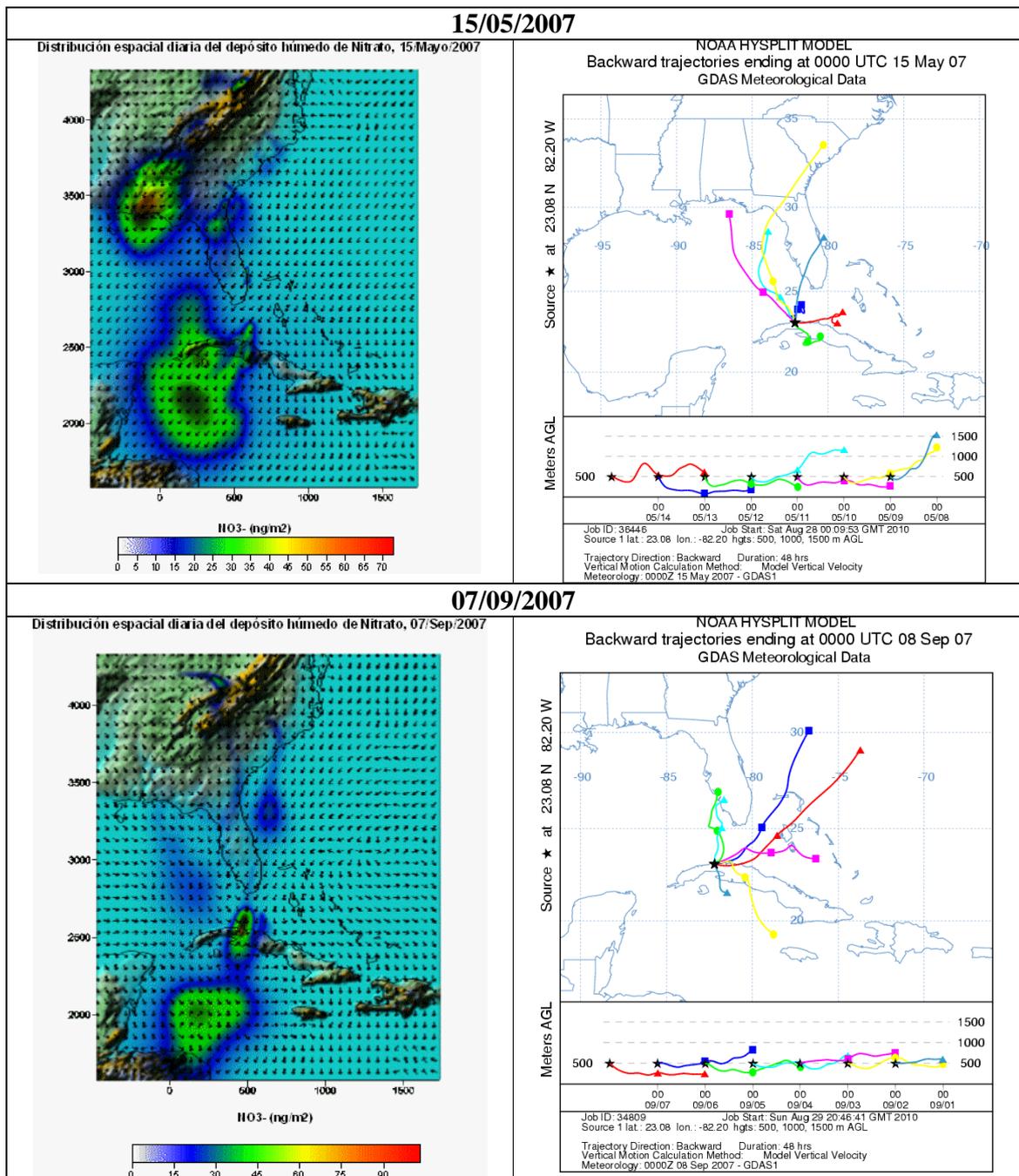


Figura 3.3.2.2. Flujo diario promedio del depósito húmedo de nitrato asociado a las trayectorias inversas de masas de aire para el periodo lluvioso. Fuente: Elaboración propia a partir de Draxler et al. (2009)

Los valores que se alcanzan para eventos individuales son comparables a otros informados (Ayars y Gao, 2007; Baumgardner *et al.*, 2002; Fujita *et al.*, 2003; Golden y Boyer, 2009; Inomata *et al.*, 2009; Maruyama *et al.*, 2010; Poor *et al.*, 2006; Rojas y Venegas, 2008; Rojas y Venegas, 2009) para otras regiones del planeta. Así, en el presente estudio se alcanzan tasas de depositación húmeda de nitrógeno anuales que oscila entre 0,5 y 5,11 kg-N/ha/año, obteniéndose los valores máximos diarios para los días 6 y 7 de septiembre de 50 y 90 ng-NO₃⁻/m² (Figura 3.3.2.2).

3.4 Formación de ozono troposférico

A partir del procedimiento descrito en el capítulo anterior se realizó una selección de los días con condiciones meteorológicas favorables para la formación del ozono troposférico dentro del periodo del presente estudio (USEPA, 1998), se consideraron solamente los tres meses (Febrero, Abril y Noviembre), de acuerdo a los datos históricos medidos en la estación de Casablanca y según los resultados alcanzados, en dichos meses se han registrado las mayores concentraciones de ozono, consecuencia de una persistente masa anticiclónica rica en ozono de origen continental (Ramírez, 1989) (Ver Anexo 7).

La formación del ozono troposférico responde a patrones sinópticos que se asocian con persistencia durante los meses seleccionados a 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 NO₂.

Ahora bien, para obtener las concentraciones de ozono, se procedió al cálculo del flujo actínico por hora del día para cada uno de los días seleccionados y de la constante de fotólisis J (Ver Anexo 8).

Por último, se obtuvieron las curvas de ajuste de la función de la sección eficaz y del rendimiento cuántico (Seinfeld y Pandis, 2006) para aplicar la ecuación para el cálculo de la constante de fotólisis de la molécula de NO₂ (Ver Anexo 9).

Se ejecutó el modelo CALPUFF cambiando el mecanismo químico de MESOPUFF II a RIVAD/ARM3 (Véase epígrafe 2.7.1) y su correspondiente módulo de post procesamiento CALPOST para obtener las concentraciones de los NO_x como NO₂ y NO, respectivamente.

También se realizó un ensayo para el estudio de sensibilidad para comparar los resultados de la ejecución del modelo tomando criterios en la proporción de las tasas de emisión de entrada diferentes, es decir se probó, en un primer caso con el porcentaje 90 % de NO₂ y el 10 % de NO y en segundo lugar con 60 % para el NO₂ y el 40% NO (Idriss and Spurrell, 2009), obteniéndose resultados casi similares (Ver Anexo 10).

Y por último se representa gráficamente las concentraciones de ozono calculadas a partir del modelo anteriormente descrito (Véase epígrafe 2.8.1, Ecuación 9).

Debido a que el modelo de dispersión CALPUFF no es lineal no podríamos estar hablando de una proporción con respecto a los valores de las concentraciones de NO_x (Scire et al., 2000b) pero si es posible realizar un análisis aceptado en relación a los órdenes de magnitud de las concentraciones de ozono obtenidas a partir del balance total de las emisiones de NO_x considerados en domino del estudio (Véase epígrafe 2.5.1).

En el caso de Cuba, se tomaron las emisiones provenientes de las ocho termoeléctricas principales del país, las cuales representan un **70 %**, y de ellas, las que se localizan en La Habana, las que contribuyen con un **23%** de la emisión total anual de NO_x para la localidad seleccionada para la simulación de las concentraciones de O₃: Casablanca apenas tiene el **0,5%** para el sector de la energía, el valor de **30 Gg** (López, et al., 2009).

En la Tabla 3.4.1 muestra la distribución de las emisiones de las fuentes de combustión (Centrales Termoeléctricas) en Cuba (Véase figura 3.1.1).

Tabla 3.4.1. Emisiones de NO_x a partir de las CTE en Cuba

CTE	Miles de ton/año
L1: Máximo Gómez	3,78
L2: Este de La Habana	2,59
L3: Otto Parellada	0,54
L4: Antonio Guiteras	3,04
L5: Carlos M. Céspedes	2,12
L6: 10 de Octubre	3,05
L7: FELTON Lidio R. Pérez	3,73
L8: Antonio Maceo	2,33
Total	21,17

Los valores promedio horarios de las concentraciones de ozono promedio para los meses seleccionados obtenidas a partir del modelo Euleriano aparecen en las Figuras 3.4.2. 3.4.3 y 3.4.4:

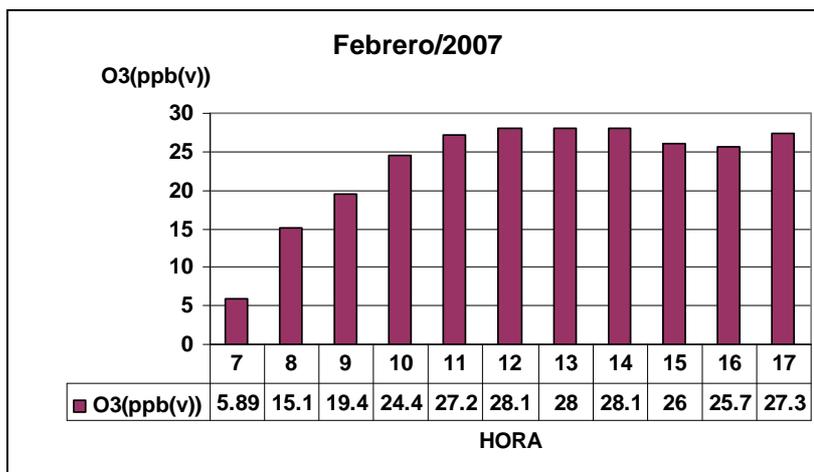


Figura 3.4.1. Comportamiento promedio horario mensual de las concentraciones de ozono, Casablanca, La Habana, Febrero/2007.

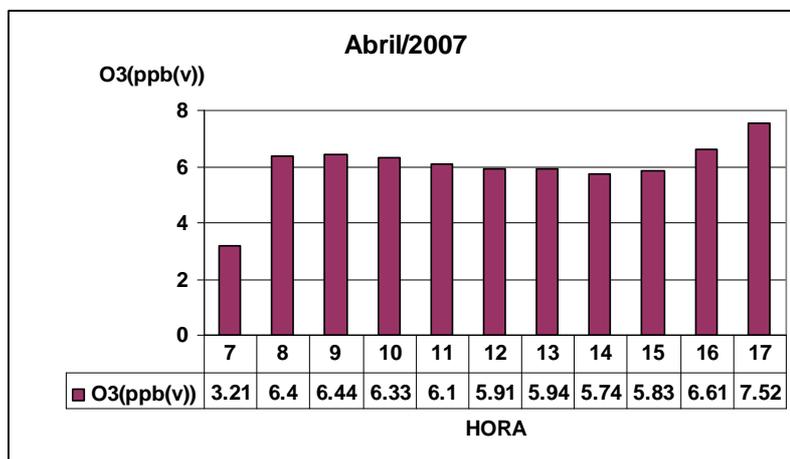


Figura 3.4.2. Comportamiento promedio horario mensual de las concentraciones de ozono, Casablanca, La Habana, Abril/2007.

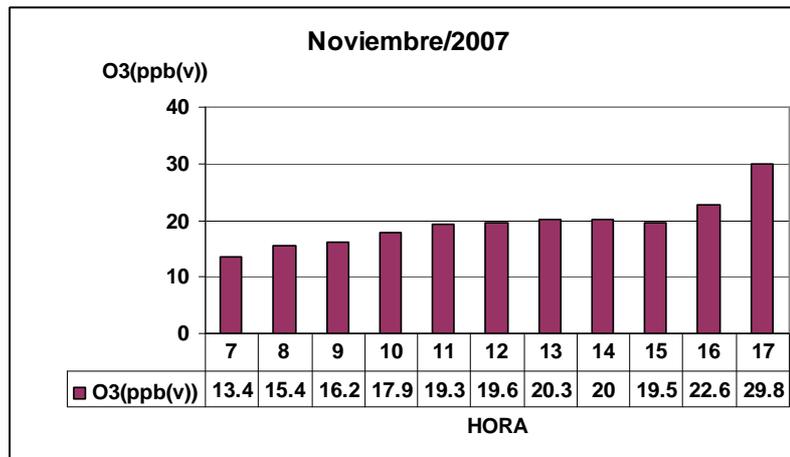


Figura 3.4.3. Comportamiento promedio horario mensual de las concentraciones de ozono, Casablanca, La Habana, Noviembre/2007.

Las concentraciones de ozono obtenidas a partir del modelo simple se corresponden con los niveles de fondo global (Harris et al., 1997) que se estaría produciendo dada las limitaciones de la información de las emisiones utilizadas en el estudio.

A continuación las Figuras 3.4.5, 3.4.6 y 3.4.7 muestran una comparación entre las concentraciones promedio mensual de ozono simuladas a niveles críticos de concentraciones de los precursores NO_x y las concentraciones medidas promedio mensuales históricas (1978-1989), representando una fracción de la emisión total de precursores tres veces el escenario simulado, debido a que no fueron considerados todos los tipos de fuentes de emisiones de NO_x ni tampoco todos los contaminantes fotoquímicos precursores tales como los compuestos orgánicos volátiles (COV) para la formación de ozono troposférico.

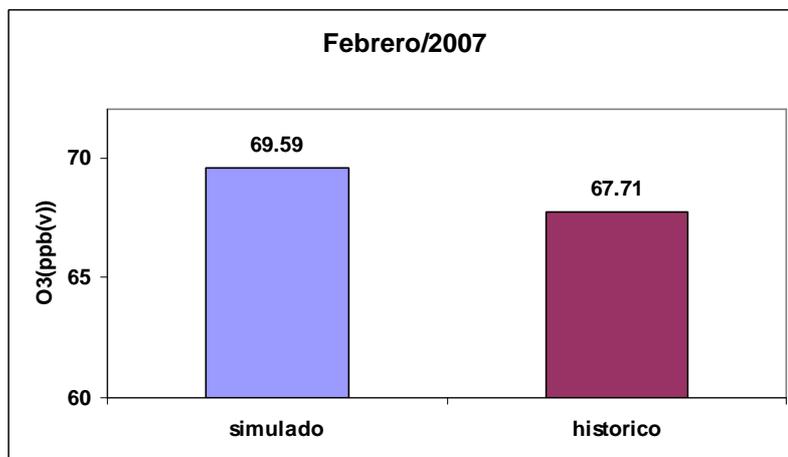


Figura 3.4.4. Relación entre los valores promedio mensual de las concentraciones de ozono para un escenario crítico de emisiones de precursores, Casablanca, La Habana, Febrero/2007.

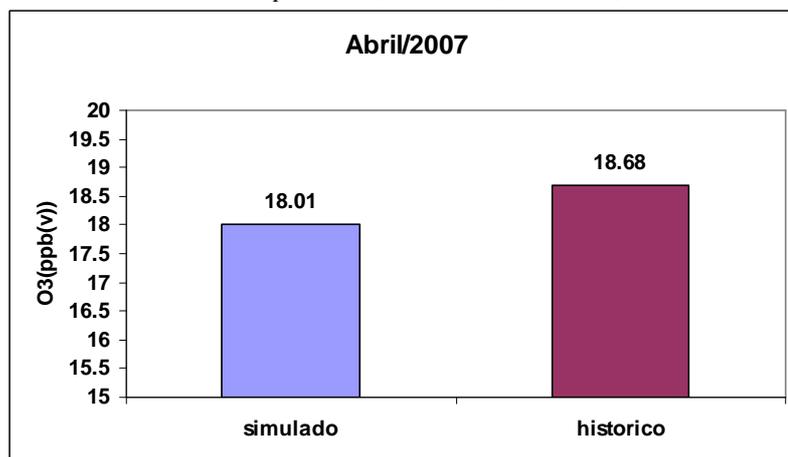


Figura 3.4.5. Relación entre los valores promedio mensual de las concentraciones de ozono para un escenario crítico de emisiones de precursores, Casablanca, La Habana, Abril/2007.

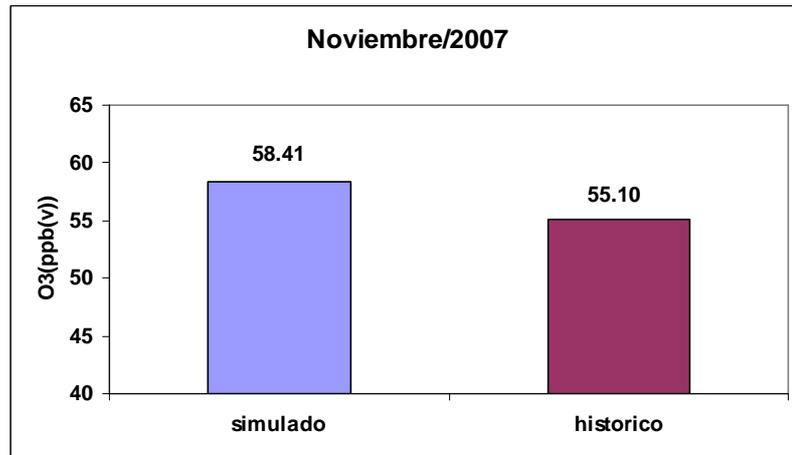
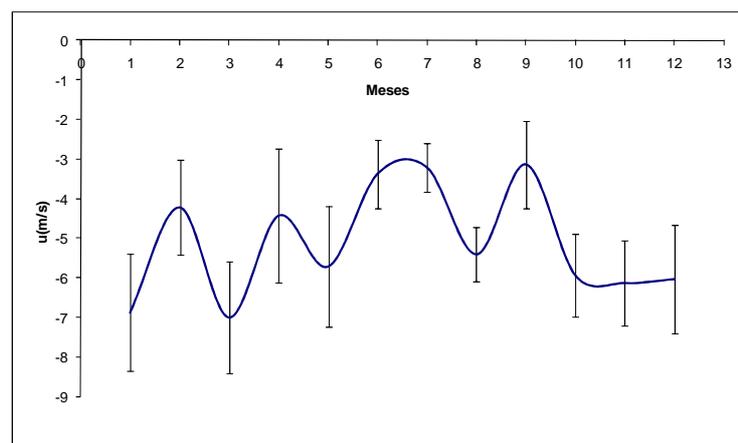


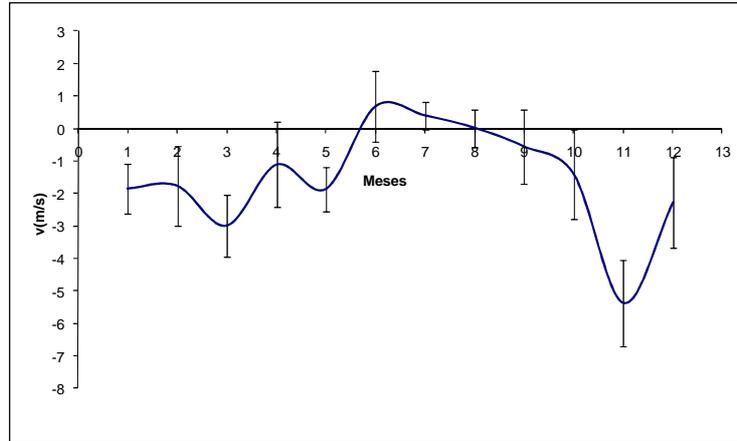
Figura 3.4.6. Relación entre los valores promedio mensual de las concentraciones de ozono para un escenario crítico de emisiones de precursores, Casablanca, La Habana, Noviembre/2007.

Previamente, a la comparación entre las concentraciones históricas promedio mensuales de ozono (1978-1989) y las calculadas para el período del estudio (2007), se realizó un análisis de la variabilidad climática del campo viento (en sus componentes u y v), en un punto de rejilla más cercano a la localidad Casablanca, La Habana a partir de los datos del proyecto: NCEP/NCAR Re-analysis (NNR).

En la Figuras 3.4.7 y 3.4.8 se puede apreciar un predominio de los vientos de componente nordeste (valor negativo de la componente u y v) en los meses seleccionados de febrero, abril y noviembre del 2007, y que favorecen el transporte transfronterizo de las concentraciones de ozono a partir del modelo simple utilizado.



3.4.7. Comportamiento mensual de las componente u del viento para la localidad de Casablanca, La Habana, 2007.



3.4.8. Comportamiento mensual de las componente v del viento para la localidad de Casablanca, La Habana, 2007.

En la Figura 3.4.9 se observa que no existe diferencias significativas entre la climatología del periodo histórico y los meses seleccionados del 2007, aunque se observa una marcada variabilidad en el caso del mes de julio/2007 con una anomalía relativa que alcanza el valor de 4 sigmas en sentido positivo con respecto al valor histórico de referencia. Por lo tanto, se puede concluir que el comportamiento de las concentraciones de ozono estimados para los meses del 2007 no están influenciados por la selección del periodo de estudio.

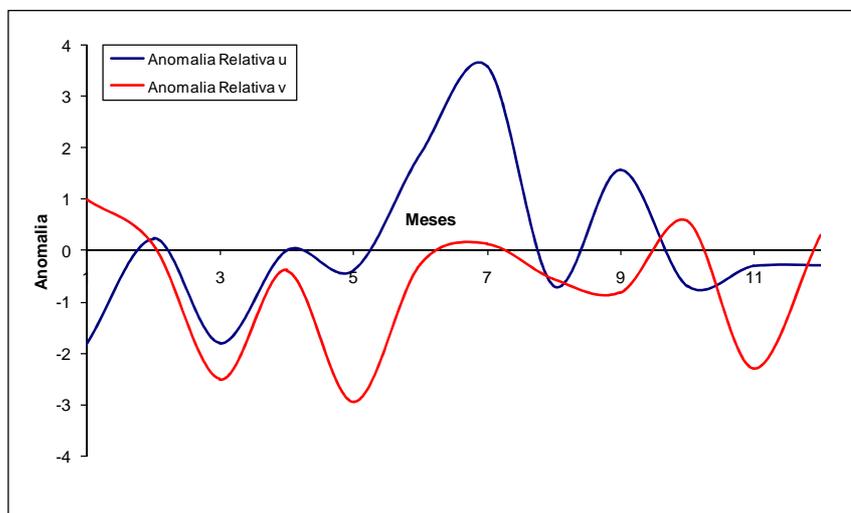


Figura 3.4.9. Anomalías relativas de las componentes u y v del viento entre el período histórico (1978-1989) y el año 2007 para la localidad de Casablanca, La Habana.

CONCLUSIONES

Por primera vez se utilizó el modelo de trayectorias de masas de aire *HYSPLIT_4* en estudio de calidad del aire en el país, y los resultados alcanzados verificaron que existe un predominio de las contribuciones provenientes de fuentes de emisiones transfronterizas en el periodo poco lluvioso (Noviembre-Abril), mientras que las mayores contribuciones desde fuentes de emisiones locales se produce durante el periodo lluvioso (Mayo-October).

La relación entre las trayectorias inversas de masas de aire y los tipos de situaciones sinópticas permitió establecer un patrón típico para ambos periodos poco lluvioso y lluvioso que explican el transporte transfronterizo durante el periodo poco lluvioso con el predominio de los Anticiclones Migratorios contrastante con el periodo 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.

La aplicación del sistema de modelación CALMET/CALPUFF a escala regional verificó que los valores de las concentraciones de los precursores gaseosos NO_x se corresponden con los niveles observados de fondo regional (López, 2007), y la depositación húmeda de nitrato verificó que las mayores tasas coinciden con zonas con emisiones antropogénicas locales de precursores de la acidez (tramo costero: Mariel Varadero, Cienfuegos, Santa Clara, Nuevitas y la zona minero metalúrgica del norte de la provincia de Holguín). 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 debido a la limitación del inventario de emisiones de fuentes utilizado.

A pesar de la simplicidad y limitaciones de la información pre-existente, los resultados obtenidos en este estudio representan un importante avance para la discusión futura de la gestión de la calidad del aire en Cuba. Los resultados alcanzados a partir de la modelación del transporte, la dispersión y las transformaciones químicas de los precursores gaseosos de los procesos de depositación ácida húmeda a escala regional, permiten contar con una herramienta metodológica adecuada para la planificación y gestión de la calidad del aire en Cuba.

RECOMENDACIONES

En nuestra perspectiva más inmediata, se requiere fortalecer el Sistema Nacional de Vigilancia de la Contaminación Atmosférica (SINVCA), a fin de contribuir al diseño e instalación de nuevas estaciones de monitoreo de la calidad del aire en las áreas del país comprometidas por el impacto de la depositación húmeda ácida y sus daños a la salud humana y a diferentes ecosistemas terrestres y marinos vulnerables.

El método implementado y los resultados alcanzados en esta tesis con respecto a la formación de ozono troposférico, deberían ser desarrollados en futuras investigaciones a partir de contar con inventarios de emisiones locales y transfronterizas con mayor información en detalle, lo cual contribuiría al mejoramiento de las normativas de emisiones y calidad del aire, en el entendimiento de la problemática ambiental nacional.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aherne, J., Mongeon A., Watmough S.A. (2010) Temporal and spatial trends in precipitation chemistry in the Georgia Basin, British Columbia. *Journal of Limnology* 69:4-10.
- Alessandrini, S., Ferrero E., Pertot C., Castelli S.T., Orlandi E. (2010) Turbulence closure in atmospheric circulation model and its influence on the dispersion. *International Journal of Environment and Pollution* 40:36-48.
- Altshuller, A.P. y Lefohn, A.S. (1996). Background ozone in the planetary boundary layer over the United States. *J. Air & Waste Manag. Assoc.* 46, 134-141.
- Alvarado, M.J., Wang C., Prinn R.G. (2009) Formation of ozone and growth of aerosols in young smoke plumes from biomass burning: 2. Three-dimensional Eulerian studies. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 114.
- AGENCIA DEL MEDIO AMBIENTE (AMA). (2004). Situación Ambiental de Cuba, 2004, La Habana, Cuba.
- Amann, M., Baldi M., Heyes, C., Klimont, Z. y Schopp, W. (1995). Integrated assessment of emission control scenarios, including the impact of tropospheric ozone. *Water Air and Soil Pollution* 85:2595-2600.
- Ambachtsheer, P.C. (2004). Combined Use of Models and Measurements for Spatial Mapping of Concentrations and Deposition of Pollutants, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canadá.
- Anastassopoulos, A., Nguyen, S. y Xiaohong, X. (2004). On the Use of the HYSPLIT Model to Study Air Quality in Windsor, Ontario, Canada. *Environmental Informatics Archives* 2: 517-525.
- Ayars, J. y Gao, Y. (2007). Atmospheric nitrogen deposition to the mullica river-great bay estuary. *Marine Environmental Research* 64(5): 590-600.
- Ayers, G. P., Gillett, R. W., Ginting, N., Hooper, M., Selleck, P. W. y Tapper, N. (1995). Atmospheric sulfur and nitrogen in West Java. *Water Air and Soil Pollution* 85(4): 2083-2088.
- Baisre, J. A. (2006). Assessment of nitrogen flows into the Cuban landscape. *Biogeochemistry* 79(1-2): 91-108.
- Baumgardner, R. E., Lavery, T. F., Rogers, C. M. y Isil, S. S. (2002). Estimates of the atmospheric deposition of sulfur and nitrogen species: Clean Air Status and Trends Network, 1990-2000. *Environmental Science & Technology* 36(12): 2614-2629.
- Bellasio, R., Maffei G., Scire J.S., Longoni M.G., Bianconi R. y Quaranta N. (2005) Algorithms to account for topographic shading effects and surface temperature dependence on terrain elevation in diagnostic meteorological models. *Boundary-Layer Meteorology* 114:595-614.
- Borge, R., Lumbreras, J., Vardoulakis, S., Kassomenos, P. y Rodriguez, E. (2007). Analysis of long-range transport influences on urban PM10 using two-stage atmospheric trajectory clusters. *Atmospheric Environment* 41(21): 4434-4450.
- Bytnerowicz, A., Cayan, D., Riggan, P., Schilling, S., Dawson, P., Tyree, M., Wolden, L., Tissell, R. y Preisler, H. (2010). Analysis of the effects of combustion emissions and Santa Ana winds on ambient ozone during the October 2007 southern California wildfires. *Atmospheric Environment* 44(5): 678-687.
- Collett, R. S. y K. Dyuyemi (1997). Air quality modelling: a technical review of mathematical approaches. *Meteorol. Appl.* 4, 235-246.

- Collins, W., Stevenson, D., Johnson, C. y Derwent, R. (2000). The european regional ozone distribution and its links with the global scale for the years 1992 and 2015. . *Atmospheric Environment* 34: 255-267.
- Cowling, E., Galloway, J. N., Furiness, C. y Erisman, J. W. (2002). Optimizing Nitrogen Management in Food and Energy Production In *Second International Nitrogen Conference* Potomac, USA.
- Cuesta, O. A., Maren, A. y Wallo, A. (2009). Características principales de la contaminación atmosférica a nivel local y regional en Cuba. *Informe Científico Técnico INSMET*, La Habana, Cuba. 12p.
- Cuesta, O., Collazo, A., Wallo, A., López, R. y Marén, A. (2008). Deposición de Nitrógeno Atmosférico en Zonas Urbanas y Rurales en Cuba. V *SIMPOSIO UNIVERSITARIO IBEROAMERICANO SOBRE MEDIO AMBIENTE (VSUIMA)*. *Memorias Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura*. Ministerio de Educación Superior (MES), La Habana, Cuba.
- Cuesta, O., Sánchez, P., González, M., Wallo, A. y Collazo, A. (2000). Caracterización de la deposición de los principales compuestos gaseosos del nitrógeno y el azufre a nivel regional en Cuba. Efectos potenciales al medio ambiente. *Informe Científico Técnico*, 89. Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba.
- Cuesta, O. A., González, M. L. y Collazo, A. E. (1996). Algunas Características de la Deposición del Nitrógeno Atmosférico en Cuba. *Ciencias Ambientales* 12: 47-53.
- Cuesta, O. A. (1995). Caracterización de las concentraciones de los principales compuestos del Nitrógeno atmosférico en Cuba y su relación con los tipos de situación sinóptica. *Tesis de Doctorado en Ciencias Geográficas*, Universidad de La Habana, *Facultad de Geografía*, La Habana, Cuba. 102p.
- Chou, C. C. K., Lee, C. T., Yuan, C. S., Hsu, W. C., Lin, C. Y., Hsu, S. C. y Liu, S. C. (2008). Implications of the chemical transformation of Asian outflow aerosols for the long-range transport of inorganic nitrogen species. *Atmospheric Environment* 42(32): 7508-7519.
- Davakis E., Andronopoulos S., Kovalets I., Gounaris N., Bartzis J.G. y Nychas S.G. (2007). Data assimilation in meteorological pre-processors: Effects on atmospheric dispersion simulations. *Atmospheric Environment* 41:2917-2932.
- Deininger, C. y Saxena, V. (1997). A validation of back trajectories of air masses by principal component analysis of ion concentrations in cloud water. *Atmospheric Environment* 31: 295-300.
- Derwent, R., Stevenson, D., Collins, W. y Johnson, C. (2004). Intercontinental transport and the origins of the ozone observed at surface sites in Europe. *Atmospheric Environment* 38: 1891-1901.
- Douglas S.G., Kessler R.C. (1988). User's Guide to the diagnostic wind model (Version 1.0) System Applications Inc., California.
- Draxler, R., Stander, B., Rolph, G., Stein, A. F. y Taylor, A. (2009). HYSPLIT User's Guide version 4.
- Draxler, R. R. y Hess, G. D. (1997). Description of the Hysplit_4 Modeling System, NOAA Tech Memo ERL ARL-224., 24.
- Draxler, R. R. y Hess, G. D. (1998). An Overview of the Hysplit_4 Modeling System for Trajectories, Dispersion, and Deposition. *Aust. Met. Mag* (47): 295-308.
- Fiscus, E., Booker, F. y Burkey, K. (2005). Crop responses to ozone: uptake, modes of action, carbon assimilation and partitioning. *Plant, Cell and Environment* 28: 997-1011.

- Fujita, S. I., Takahashi, A. y Sakurai, T. (2003). The wet deposition of acid and some major ions over the Japanese Archipelago. *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology* 55(1): 23-34.
- Galloway, J. N., Aber, J. D., Erisman, J. W., Seitzinger, S. P., Howarth, R. H., Cowling, E. B. y Cosby, B. J. (2003). The nitrogen cascade. *BioScience* 53: 341–356.
- Geertsema, G. T. y Schreur, B. (2009). The effect of improved nowcasting of precipitation on air quality modeling. *Atmospheric Environment* 43(32): 4924-4934.
- Golden, H. E. y Boyer, E. W. (2009). Contemporary estimates of atmospheric nitrogen deposition to the watersheds of New York State, USA. *Environmental Monitoring and Assessment* 155(1-4): 319-339.
- Goodin W.R., McRae G.J., Seinfeld J.H. (1980). An objective analysis technique for constructing three-dimensional, urban scale wind fields. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 19:98-108.
- Harris, N. R. P., Ancellet, G., Bishop, L., Hofmann, D. J., Kerr, J. B., McPeters, R. D., Préndez, M., Randel, W. J., Staehelin, J., Subbaraya, B. H., Volz-Thomas, A., Zawodny, J. y Zerefos, C. S. (1997). Trends in Stratospheric and free tropospheric ozone. *Journal of Geophysical Research*, 102(D1): 1571-1590.
- Hayashi, K., Noguchi, I., Ohizumi, T., Aikawa, M., Kitamura, M. y Takahashi, A. (2006). Wet deposition of inorganic nitrogen in Japan: Findings from the Japanese Acid Deposition Survey. 3rd International Nitrogen Conference Contributed Papers 598-608 New Jersey Science Press USA.
- Hinrichsen, D. (1988). Multiple pollutants and forest decline. *AMBIO* 15 15: 258-265.
- Hondula, D. M., Sitka, L., Davis, R. E., Knight, D. B., Gawtry, S. D., Deaton, M. L., Lee, T. R., Normile, C. P. y Stenger, P. J. (2010). A back-trajectory and air mass climatology for the Northern Shenandoah Valley, USA. *International Journal of Climatology* 30(4): 569-581.
- Hsu, Y., Holsen, T. M. y Hopke, P. K. (2003). Locating and Quantifying PCB Sources in Chicago: Receptor Modeling and Field Sampling. *Environmental Science and Technology* 37(4): 681-690.
- Hurley P., Manins P. (2003) Year-long, high resolution, urban airshed modelling: verification of TAPM predictions of smog and particles in Melbourne, Australia. *Atmospheric Environment* 37:1899-1910.
- Idriss, A. y Spurrell, F. (2009). Air Quality Model Guideline. 51. Alberta, Canada.
- Inomata, Y., Igarashi, Y., Chiba, M., Shinoda, Y. y Takahashi, H. (2009). Dry and wet deposition of water-insoluble dust and water-soluble chemical species during spring 2007 in Tsukuba, Japan. *Atmospheric Environment* 43(29): 4503-4512.
- Jansá, A. (1974). *Curso de Climatología*. Instituto Cubano del Libro, La Habana, Cuba.
- Kajino, M., Ueda, H. y Nakayama, S. (2008). Secondary acidification: Changes in gas-aerosol partitioning of semivolatile nitric acid and enhancement of its deposition due to increased emission and concentration of SO_x. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 113(D3).
- Katsoulis, B. (1999). The potential for long-range transport of air pollutants into Greece: a climatological analysis. *Science of the Total Environment International* 231 101–113.
- Lang, F.A. (2010). Estimación del potencial eólico de la región del Maule, Chile. *Memoria Ingeniería en Recursos Naturales Renovables*, Facultad Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile. 68p.

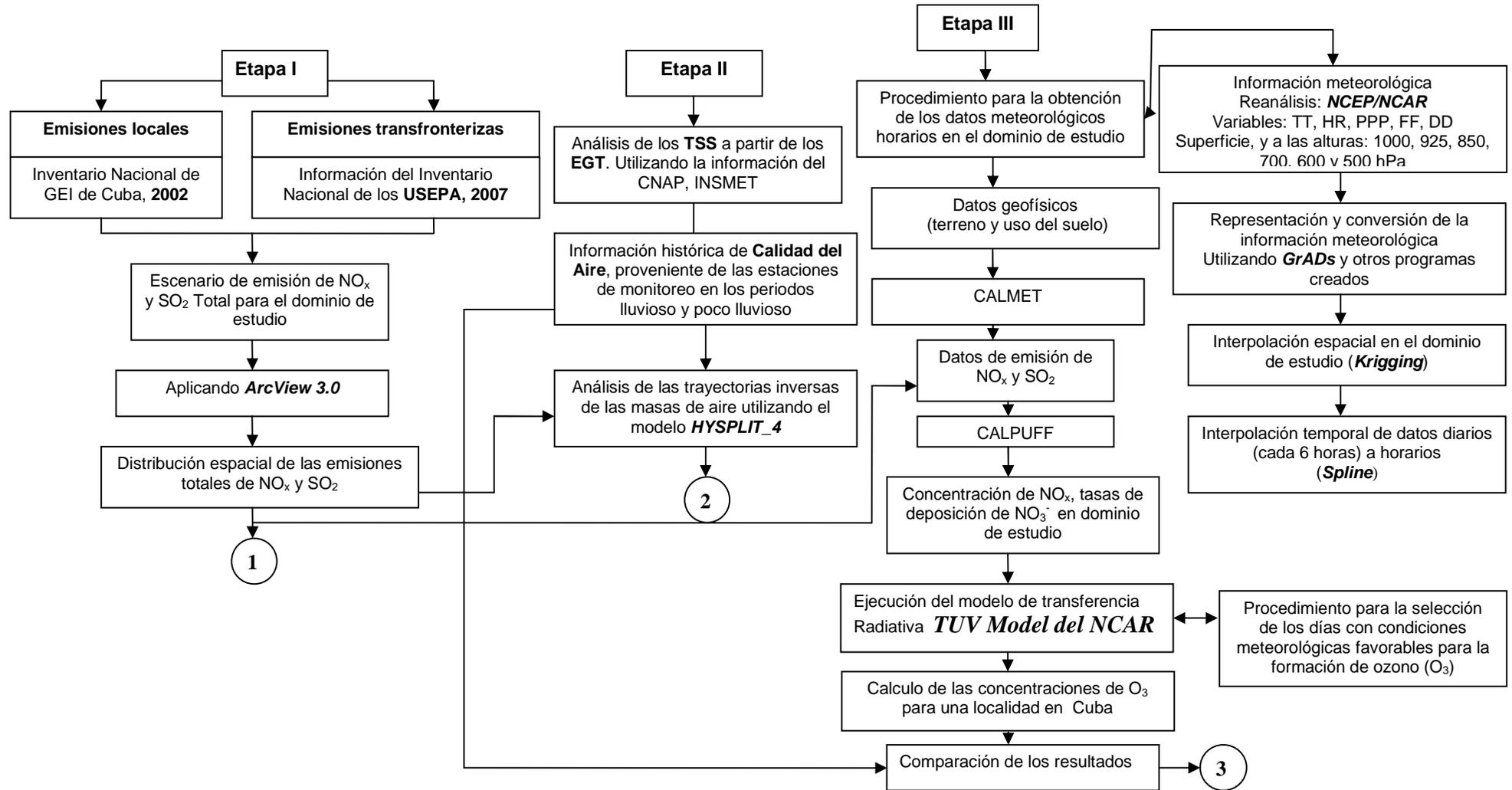
- Lapinel, B. (1989). Situaciones sinópticas predominantes sobre Cuba, *Tesis de Doctorado en Ciencias Meteorológicas*. Universidad de La Habana, La Habana, Cuba. 120p.
- Leiming, Z., Wiebe, A., Vet, R., Cristian, M., O'Brien, J. M., Iqbal, S. y Zhiyun, L. (2008). Measurements of reactive oxidized nitrogen at eight Canadian rural sites. *Atmospheric Environment* 42(34): 8065-8078.
- Levy J.I., Spengler, J.D., Hlinka, D., Sullivan, D., Moon, D. (2002) Using CALPUFF to evaluate the impacts of power plants emissions in Illinois: model sensitivity and implications. *Atmospheric Environment* 1063–1075.
- Logan, J. A. (1983). Nitrogen oxides in Troposphere: Global and regional Budgets. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 88(No. C15): 10785 - 10807.
- 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., González, M., Collazo, A., Wallo, A., Morejón, E. y Moreno, E. (1999). Aplicación de elementos de la Teoría de Manejo y Evaluación de Riesgos al Problema de la Deposición Atmosférica de Acidificantes. *Revista Cubana de Meteorología* 6(1): 23-28.
- López, C. M., Manso, R., Valdés, A., León, A., Guevara, V., González, C., Legañoa, G., González, T. M., Dávalos, J., García, M. E., Biart, R., López, I., Pérez, D. et al., (2009). Emisiones y Remociones de Gases de Invernadero en Cuba. *Reporte actualizado para el período 1990-2004*. CITMA/AMA/INSMET. La Habana, Cuba. 338p.
- LONG RANGE TRANSBOUNDARY AIR POLLUTION (LRTAP). 2010. Copenhagen: European Environment Agency (EEA). Disponible en: <http://www.unece.org/env/lrtap/>
- Lynette, J. C. y Jenkin, M. E. (2001). Analysis of the relationship between ambient levels of O₃, NO₂ and NO as a function of NO_x in the UK. *Atmospheric Environment* 35(36): 6391-6405
- MacIntosh D.L., Stewart J.H., Myatt T.A., Sabato J.E., Flowers G.C., Brown K.W., Hlinka D.J., Sullivan D.A. (2010) Use of CALPUFF for exposure assessment in a near-field, complex terrain setting. *Atmospheric Environment* 44 (2010) 262-270:9.
- 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.
- Maruyama, S., Okochi, H., Takemura, N. y Minami, Y. (2010). Long-Term Performance of a Solar-Powered Small Automatic Rainwater Collector and Its Application to Acid Deposition Monitoring in the Southeast Mountainside of Mt. Fuji. *Bunseki Kagaku* 59(4): 357-362.
- Meneses, E. y Turtós, L. (2003). Sistema para realizar la modelación de la dispersión regional de contaminantes atmosféricos en Cuba, CUBAENERGÍA, La Habana, Cuba.
- Miller, J. (1981a). A five-year climatology of five-day back trajectories from Barrow, Alaska. *Atmospheric Environment* 15: 1401–1405.
- Miller, J. (1981b). A five-year climatology of five-day back trajectories from the Mauna Loa Observatory, Hawaii. *Atmospheric Environment* 15: 1553–1558
- Miller, J., Moody, J., Harris, J. y Gaudry, A. (1993). A 10-year trajectory flow climatology for Amsterdam Island, 1980–1989. *Atmospheric Environment* 27A: 1909–1916.
- Mizak, C. A., Campbell, S. W., Luther, M. E., Carnahan, R. P., Murphy, R. J. y Poor, N. D. (2005). Below-cloud ammonia scavenging in convective thunderstorms at a coastal research site in Tampa, FL, USA. *Atmospheric Environment* 39(9): 1575-1584.

- NATIONAL EMISSION INVENTORY (NEI). 2007. US. National Emission Inventory. *US. Environmental Protection Agency*, (Eds US. EPA).
- NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA) 1999. HYSPLIT model version 4. Air Resource Laboratory (ARL) READY.
- NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA) 2010. HYSPLIT, HYbrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory versión 4. National Oceanic and Atmospheric Administration. Disponible en: <http://www.ready.noaa.gov/ready/hysplit4.html>
- OFICINA NACIONAL DE ESTADÍSTICAS (ONE) 2006. Primer Compendio de Estadísticas del Medio Ambiente de Cuba, 1990-2004. La Habana, Cuba. 132p.
- OFICINA NACIONAL DE ESTADÍSTICAS (ONE) 2007. Estadísticas Energéticas en La Revolución. (Eds. CUBAENERGIA). La Habana, Cuba. 50p.
- Pastor-Bárceñas, O., Soria-Olivas, E., Martín-Guerrero, J., Camps-Valls, G., Carrasco-Rodríguez, J. y Del Valle-Tascón, S. (2005). Unbiased sensitivity analysis and pruning techniques in neural networks for surface ozone modelling. *Ecological Modelling* 182: 149-158.
- Pielke, R.A. y Uliasz, M. (1998). Use of meteorological models as input to regional and mesoscale air quality models-limitations and strengths. *Atmospheric Environment* 32:1455-1466.
- Poissant, L. (1999). Potential sources of atmospheric total gaseous mercury in the St. Lawrence River valley. *Atmospheric Environment* Vol 33: 2537-2547.
- Ponce-Mendoza, A., Boeckx, P., Gutierrez-Miceli, F. O., Cleemput, V. y Dendooven, L. (2006). Influence of water regime and N availability on the emission of nitrous oxide and carbon dioxide from tropical, semi-arid soils of Chiapas, Mexico. *Journal of Arid Environments* 64(1): 137-151.
- Poor, N., Pollman, C., Tate, P., Begum, M., Evans, M. y Campbell, S. (2006). Nature and magnitude of atmospheric fluxes of total inorganic nitrogen and other inorganic species to the Tampa Bay watershed, FL, USA. *Water Air and Soil Pollution* 170(1-4): 267-283.
- Prather, M., Ehhalt, D., Dentener, F., Berntsen, F. y Smith, S. (2001). Atmospheric chemistry and greenhouse gases. Climate Change 2001. In *Climate Change 2001: the Scientific Basis Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 239-287 (Eds D. Y. En: Houghton JT, Griggs DJ, Noguer M, Van der Linden PJ, Dai and M. K. X, Johnson CA. Cambridge, UK: Cambridge University Press .
- Ramírez, J. (1989). Estudio de las variaciones en las concentraciones de ozono troposférico en Cuba y su vinculación con algunos fenómenos meteorológicos. *Tesis de Doctorado en Ciencias Geográficas*, Universidad de La Habana, La Habana, Cuba, 100p.
- Ridley, B., Atlas, E., Selkirk, H., Pfister, L., Montzka, D., Walega, J., Donnelly, S., Stroud, V., Richard, E., Kelly, K., Tuck, A., Thompson, T., Reeves, J., Baumgardner, D., Rawlins, W. T., Mahoney, B., Herman, R., Friedl, R., Moore, F., Ray, E. (2004). Convective transport of reactive constituents to the tropical and mid-latitude tropopause region: I. Observations. *Atmospheric Environment* 38(9): 1259-1274.
- Rodríguez, M. A., Barna, M. G., Gebhart, K. A., Hand, J. L., Adelman, Z. E., Schichtel, B. A., Collett, J. L. J. y Malm, W. C. (2011). Modeling the fate of atmospheric reduced nitrogen during the Rocky Mountain Atmospheric Nitrogen and Sulfur Study (RoMANS): Performance evaluation and diagnosis using integrated processes rate analysis. *Atmospheric Environment* 45(1): 223-234.

- Rojas, A. L. P. y Venegas, L. E. (2009). Atmospheric deposition of nitrogen emitted in the Metropolitan Area of Buenos Aires to coastal waters of de la Plata River. *Atmospheric Environment* 43(6): 1339-1348.
- Rojas, A. L. P. y Venegas, L. E. (2008). Dry and wet deposition of nitrogen emitted in Buenos Aires City to waters of de la Plata River. *Water Air and Soil Pollution* 193(1-4): 175-188.
- Rolph, G.D., 2010. Real-Time Environmental Applications and Display SYstem (READY) website: <http://ready.arl.noaa.gov>. NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, M.D.
- Sánchez, M. y Turtós, L. (2002). Dispersión y deposición de especies ácidas en América Central y el Caribe, CUBASOLAR, La Habana. Cuba. 14 p.
- Sang-Keun, S., Zang-Ho, S., Ki-Hyun, K., Yoo-Keun, K. y Raktim, P. (2008). Dispersion and photochemical oxidation of reduced sulfur compounds in and around a large industrial complex in Korea. *Atmospheric Environment* 42:4269-4279.
- Scire, J. S., Robe, F. R., Yamartino, R. J. y Fernau, M. E. (2000a). A User's Guide for the CALMET meteorological model (Version 5.0). *Earth Tech, Inc* (Concord, MA), EEUU. 332p.
- 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. 521p
- Schichtel, B. y Husar, R. (2001). Eastern North American transport climatology during high- and low-ozone days. *Atmospheric Environment* 35: 1029–1038.
- Seinfeld, J. H. (Ed) (1986). *Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution*. New York: Wiley Interscience.
- Seinfeld, J.H., Pandis S.N. (2006). *Atmospheric and Physics from Air Pollution Climate Change*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 1249p.
- Sherman, C.A. (1978). A mass consistent Model for Wind Fields over Complex Terrain. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 17:312-319.
- Sistla, G., Winston H., Jia-Yeong K., Kallos G., Zhang K., Mao H. y Rao S.T. (2000). An operational evaluation of two regional-scale ozone air quality modelling systems over the Eastern United States. *Bulletin of the American Meteorological Society* 82:945-964.
- Sjoedin, A. y Greenfelt, P. (1984). Regional background concentrations of nitrogen dioxide in Sweden. *Phys- Chem. Behav. Atmos. Pollut. EUR* 94 36: 401-411.
- Sogn, T. A. y Abrahamsen, G. (1998). Effects of N and S deposition from an acid forest soil and growth of scots pine (*Pinus silvestri* L.) after 5 years of treatment. *Forest Ecology and Management* 103(2-3): 18p.
- Stohl, A. (1998). Computation, accuracy and applications of trajectories– a review and bibliography. *Atmospheric Environment* 32: 947–966.
- Stohl, A., Haimberger, L., Scheele, M. y Wenli, H. (2001). An intercomparison of results from three trajectory models. *Meteorological Applications* 8 127–135.
- Sutton, M. A., Tang, Y. S., Dragosits, U., Fournier, N., Dore, T. y Smith, R. I. (2001). A spatial analysis of atmospheric ammonia and ammonium in the UK. *The Scientific World* (1): 275-286.
- Trebs, I., Lara, L. L., Zeri, L. M. M., Gatti, L. V., Artaxo, P., Dlugi, R., Slanina, J., Andreae, M. O. y Meixner, F. X. (2006). Dry and wet deposition of inorganic nitrogen compounds to a tropical pasture site (Rondonia, Brazil). *Atmospheric Chemistry and Physics* 6: 447-469.
- Turtos, L., Meneses, E. y Díaz, N. (2003). Dispersión local de contaminantes atmosféricos producto de la generación eléctrica. Caso de Estudio: Central Termoeléctrica Carlos Manuel de Céspedes de Cienfuegos. 12p.

- Turtós, L., Meneses, E., Sánchez, M., Rivero, J. y Rivero, N. (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* 41: 2202-2213.
- UNITED STATE ENVIRONMENTAL AGENCY (US. EPA). 1998.Guideline on ozone monitoring site selection. Office of Air Quality EPA-454/R-98-002. Environmental Protection Planning and Standards .Agency Research Triangle Park, NC 27711. 95p.
- UNITED STATE ENVIRONMENTAL AGENCY (US. EPA) 2010.Clean & Market. Disponible en: <http://camddataandmaps.epa.gov/gdm/index.cfm>
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY GLOBAL & LAND COVER CHARACTERIZATION (USGS) 2002. CALPUFF Training Course. Practical Applications. Santiago de Chile, March/2008. CD-ROM and Documentation.
- Velázquez, F. (1997). Modelización y análisis de las concentraciones de ozono troposférico. *Facultad de ciencias químicas, Departamento de ingeniería química*, vol. doctor en ciencias químicas, 385 madrid: Universidad Complutense de Madrid.
- Vingarzan, R. (2004). A review of surface O₃ background levels and trends. *Atmospheric Environment* 38: 3431-3442.
- Winston, T. L., Kelley, P., Lefer, B. L., Flynn, J., Rappengluck, B., Leuchner, M., Dibb, J. E., Ziemba, L. K., Anderson, C. H. y Buhr, M. (2010). Measurements of primary trace gases and NO_y composition in Houston, Texas. *Atmospheric Environment* 44(33): 4068-4080.
- World Meteorological Organization (W.M.O) (2009). El Tiempo, el clima y el aire que respiramos. No. 1035, Geneva, Switzerland.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). (1986). Environmental Pollution Monitoring Research Programme. Vol. 45, 151 Geneva, Switzerland.
- Zannetti, P. y Puncket, K. (2004). Air Quality Modeling: Theories, Methodologies, Computational Techniques, and Available Databases and Software - Vol. Volume I – Fundamentals, 430: A&WMA and the EnviroComp Institute.

ANEXOS Anexo 1. Diagrama Metodológico del estudio



Anexo 2. Localización de las fuentes emisiones atmosféricas de NO_x y SO₂ en la parte Sudeste de los Estados Unidos.

Tabla 1. Localización de las fuentes de Emisión Atmosféricas de NO_x y SO₂ para la Florida (FL).

No.	Nombre de la Instalación	Lat. (grados N)	Lon. (grados W)
1	ST JOHNS RIVER (207)	30°26'	-81°33'
2	FLORIDA POWER & LIGHT CAPECANAVERAL (609)	28°28'	-80°46'
3	FLORIDA POWER & LIGHT(PPE)-PORTEVERGLADES (617)	26°05'	-80°08'
4	FLORIDA POWER & LIGHT(PRV)-RIVIERA (619)	26°46'	-80°03'
5	TURKEY POINT (621)	25°26'	-80°20'
6	P L BARTOW (634)	27°52'	-82°36'
7	CRIST ELECTRIC GENERATING PLANT (641)	30°34'	-87°14'
8	GAINESVILLE REGIONAL UTILITIES DEERHAVEN (663)	29°46'	-82°23'
9	NORTHSIDE (667)	30°25'	-81°33'
10	LAKELAND MCINTOSH POWER PLANT (676)	28°05'	-81°56'
11	FLORIDA POWER & LIGHT(PMR)-MARTIN (6043)	27°03'	-80°34'

Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos de (NEI, 2007)²

Tabla 2. Localización de las fuentes de Emisión Atmosféricas de NO_x y SO₂ para Carolina del Sur (SC).

No.	Nombre de la Instalación	Lat. (grados N)	Long (grados W)
1	SANTEE COOPER CROSS (130)	33°22'	-80°07'
2	PROGRESS ENERGY ROBINSON (3251)	34°24'	-80°10'
3	DUKE ENERGY : LEE (3264)	34°36'	-82°26'
4	SCE & G CANADYS (3280)	33°04'	-80°37'
5	SCE & G MCMEEKIN (3287)	34°03'	-81°13'
6	SCE & G URQUHART (3295)	33°26'	-81°55'
7	SCE & G WATEREE (3297)	33°50'	-80°37'
8	SCE & G WILLIAMS (3298)	33°01'	-79°56'
9	SANTEE COOPER GRAINGER (3317)	33°50'	-79°03'
10	SANTEE COOPER JEFFERIES (3319)	33°15'	-79°59'
11	SANTEE COOPER WINYAH (6249)	33°20'	-79°22'
12	SCE & G COPE (7210)	33°22'	-81°02'
13	SANTEE COOPER RAINEY (7834)	34°21'	-82°47'

Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos de (NEI, 2007)

² Disponible en: <http://camddataandmaps.epa.gov/gdm/index.cfm> (marzo de 2010)

Tabla 3. Localización de las fuentes de emisión de NO_x y SO₂ para Carolina de Norte (NC).

No	Nombre de la Instalación	Lat. (grados N)	Long (grados W)
1	Progress Energy Carolinas-Cape Fear PI (2708)	35°36'	-79°03'
2	Progress Energy-F Lee Plant (2709)	35°23'	-78°05'
3	Progress Energy – Roxboro Plant (2712)	36°29'	-79°04'
4	LV Sutton Steam Electric Plant (2713)	34°17'	-77°59'
5	Duke Power Company LLC-Allen Steam Station (2718)	35°11'	-81°01'
6	Duke Power Company LLC- Buck Steam Station (2720)	35°43'	-80°23'
7	Duke Energy Corporation- Cliffside Steam (2721)	35°13'	-81°46'
8	Duke Power Company LLC-Dan River Steam (2723)	36°29'	-79°43'
9	Duke Energy Corporation – Marshall Steam (2727)	35°36'	-80°58'
10	DUKE ENERGY CORP RIVERBEND STEAM STATION (2732)	35°22'	-80°58'
11	Progress Energy – Mayo Facility (6250)	36°32'	-78°54'
12	Duke Power Company LLC - Belews Creek St (8042)	36°17'	-80°04'

Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos de (NEI, 2007)

Tabla 4. Localización de las fuentes de Emisión Atmosféricas de NO_x y SO₂ para Alabama (AL).

No.	Nombre de la Instalación	Lat. (grados N)	Long (grados W)
1	Alabama Power Company Barry (3)	31°00'	-88°01'
2	Alabama Power Company Gadsden (7)	34°01'	-85°58'
3	Alabama Power Company Gorgas (8)	33°39'	-87°12'
4	Alabama Power Company Greene County (10)	32°36'	-87°47'
5	Alabama Power Company E C Gaston (26)	33°15'	-86°27'
6	TVA-Colbert (47)	34°45'	-87°51'
7	TVA-Widows Greek (50)	34°53'	-85°45'
8	CHARLES R. LOWMAN Power Plant (56)	31°29'	-87°55'
9	Alabama Power Company MILLER (6002)	33°38'	-87°04'

Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos de (NEI, 2007)

Tabla 5. Localización de las fuentes de Emisión Atmosféricas de NO_x y SO₂ para Mississippi (MS).

No.	Nombre de la Instalación	Lat. (grados N)	Long (grados W)
1	Watson Electric Generating Plant (2049)	30°26'	-89°02'
2	R D Morrow Senior Generating Plant (6061)	31°13'	-89°24'
3	Daniel Electric Generating Plant (6073)	30°32'	-88°33'
4	Red Hills Generation Facility (55076)	33°23'	-89°13'

Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos de (NEI, 2007)

Tabla 6. Localización de las fuentes de Emisión Atmosféricas de NO_x y SO₂ para Virginia Occidental (WV).

No.	Nombre de la Instalación	Lat. (grados N)	Long (grados W)
1	JOHN E AMOS PLANT (3935)	38°28'	-81°49'
2	KANAWHA RIVER PLANT (3936)	38°12'	-81°25'
3	PHILIP SPORN PLANT (3938)	38°58'	-81°55'
4	MOUNTAINEER POWER STATION (6264)	38°59'	-81°56'

Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos de (NEI, 2007)

Tabla 7. Localización de las fuentes de Emisión Atmosféricas de NO_x y SO₂ para Georgia (GA).

No.	Nombre de la Instalación	Lat. (grados N)	Long (grados W)
1	Bowen (703)	34°08'	-84°55'
2	Hammound (708)	34°15'	-85°21'
3	Harllee Branch (709)	33°12'	-83°18'
4	MCDonough (710)	33°49'	-84°29'
5	Mitchell (727)	31°27'	-84°08'
6	Yates (728)	33°28'	-84°54'
7	Kraft (733)	32°09'	-81°09'
8	Wansley (6052)	33°25'	-85°02'
9	McIntosh (6124)	32°21'	-81°10'
10	Scherer (6257)	33°03'	-83°48'

Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos de (NEI, 2007)

Tabla 8. Localización de las fuentes de Emisión Atmosféricas de NO_x y SO₂ para Missouri (MO).

No.	Nombre de la Instalación	Lat. (grados N)	Long (grados W)
1	New Madrid Power Plant	36°31'	-89°34'
2	Sikeston	36°53'	-89°37'

Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos de (NEI, 2007)

Tabla 9. Localización de las fuentes de Emisión Atmosféricas de NO_x y SO₂ para Kentucky (KY).

No.	Nombre de la Instalación	Lat. (grados N)	Long (grados W)
1	Big Sandy (1353)	38.10'	-82°37'
2	E W Brown (1355)	37°47'	-84°43'
3	Ghent (1356)	38°45'	-85°02'
4	Green River (1357)	37°22'	-87°07'
5	Cane Run (1363)	38°11'	-85°53'
6	Mill Creek (1364)	38°03'	-85°55'
7	Elmer Smith (1374)	37°48'	-87°04'
8	Paradise (1378)	37°16'	-86°59'
9	Coleman (1381)	37°58'	-86°48'
10	HMP & L Station (1382)	37°39'	-87°30'
12	John S ^o Cooper (1384)	37°00'	-84°36'
13	William C ^o Dale (1385)	37°53'	-84°16'
14	East Bend (6018)	38°54'	-84°50'
15	H L Spurlock (6041)	38°42'	-83°49'
16	R D Green (6639)	37°39'	-87°30'
17	D B Wilson (6823)	37°27'	-87°05'

Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos de (NEI, 2007)

Tabla 10. Localización de las fuentes de Emisión Atmosféricas de NO_x y SO₂ para Virginia (VA).

No.	Nombre de la Instalación	Lat. (grados N)	Lon. (grados W)
1	Clinch River (3775)	36°56'	-82°12'
2	Glen Lyn (3776)	37°22'	-80°52'
3	Mirant Potomac River (3788)	38°49'	-77°02'
4	Bremo Power Station (3796)	37°43'	-78°17'
5	Chesterfield Power Station (3797)	37°23'	-77°23'
6	Chesapeake Energy Center (3803)	36°46'	-76°18'
8	Yorktown Power Station (3809)	37°13'	-76°28'
9	Clover Power Station (7213)	36°52'	-78°42'

Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos de (NEI, 2007)

Tabla 11. Localización de las fuentes de Emisión Atmosféricas de NO_x y SO₂ para Illinois (IL).

No.	Nombre de la Instalación	Lat. (grados N)	Lon. (grados W)
1	Joppa Steam (887)	37°13'	-88°52'
2	Baldwin Energy Complex (889)	38°12'	-89°51'
3	Marion (976)	37°37'	-88°57'
4	Newton (6017)	38°56'	-88°17'

Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos de (NEI, 2007)

Tabla 12. Localización de las fuentes de Emisión Atmosféricas de NO_x y SO₂ para Tennessee (TN).

No.	Nombre de la Instalación	Lat. (grados N)	Lon. (grados W)
1	Bull Run (3396)	36°01'	-84°09'
2	Cumberland (3399)	36°23'	-87°39'
3	Gallatin (3403)	36°19'	-86°24'
4	John Sevier (3405)	36°23'	-82°58'
6	Kingston (3407)	35°54'	-84°31'

Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenido de (NEI, 2007)

Tabla 13. Intervalos de frecuencia para las fuentes de emisión

Intervalos latitud	Marca de Clase	Marca de Clase	Intervalos longitud
[39.00 , 36.30]	37°45	-88°54	[-90°00 , -87°48]
[36°29 , 34°01]	35°15	-86°42	[-87°47 , -85°36]
[34°00 , 32°45]	31°30	-85°35	[-84°30 , -83°24]
[31°29 , 30°15]	29°01	-83°23	[-82°18 , -81°12]
[29°00 , 27°45]	26°30	-81°11	[-80°06 , -79°00]
[26°29 , 25°15]	24°01	-78°59	[-77°54 , -76°48]
[24°00 , 22°45]	21°30	-76°47	[-75°42 , -74°36]
[21°29 , 20°15]	19°01	-74°35	[-73°30 , -72°24]
[19°00 , 17°45]	16°30	-72°23	[-71°18 , -70°12]
[16°29 , 15°15]	14°00		

Id	Lat	Lon	# Ftes.
FL1	30°15	86°42	4
FL2	30°15	82°18	8
FL3	27°45	82°18	7
FL4	27°45	80°06	12
FL5	25°15	80°06	6

Id	Lat	Lon	# Ftes ^o
AL1	35°15	88°54	13
AL2	35°15	86°42	2
AL3	32.45	86.42	26
AL4	30.15	88.54	12

Id	Lat	Lon	# Ftes ^o
MS1	32°45	88°54	2
MS2	30°15	88°54	13

Id	Lat	Lon	# Ftes.
SC1	35°15	82°18	12
SC2	35°15	80°06	1
SC3	32°45	82°18	7
SC4	32°45	80°06	17

Id	Lat	Lon	# Ftes.
NC1	37°45	77°54	2
NC2	35°15	80°06	43

Id	Lat	Lon	# Ftes.
GA1	35°15	84°30	8
GA2	32°45	84°30	19
GA3	32°45	82°18	4
GA4	32°45	80°06	13
GA5	30°15	84°30	1

Id	Lat	Lon	# Ftes.
MO1	37°45	82°18	3

Id	Lat	Lon	# Ftes ^o
TN1	37°45	86°42	15
TN2	37°45	84°30	31
TN3	37°45	82°18	4

Id	Lat	Lon	# Ftes.
VA1	37°45	82°18	3
VA2	37°45	80°06	3
VA3	37°45	77°54	15
VA4	37°45	75°42	7

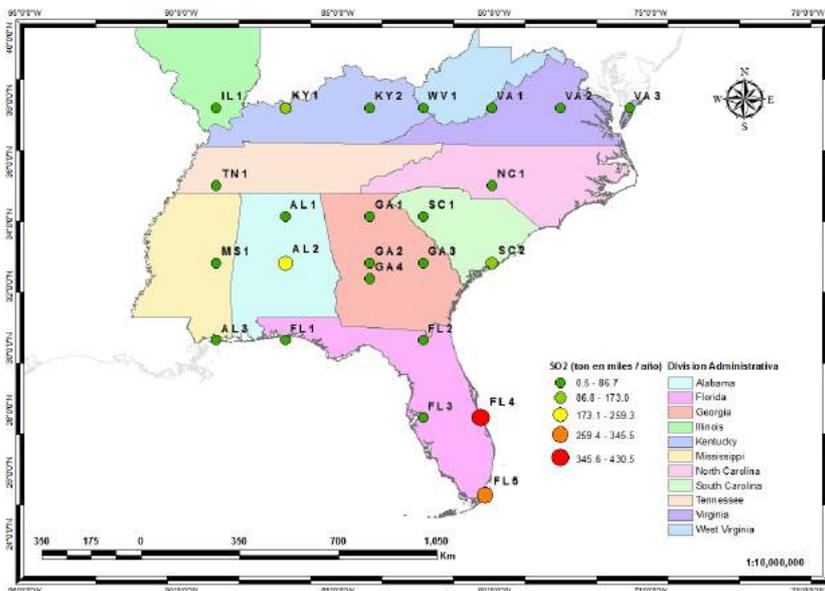
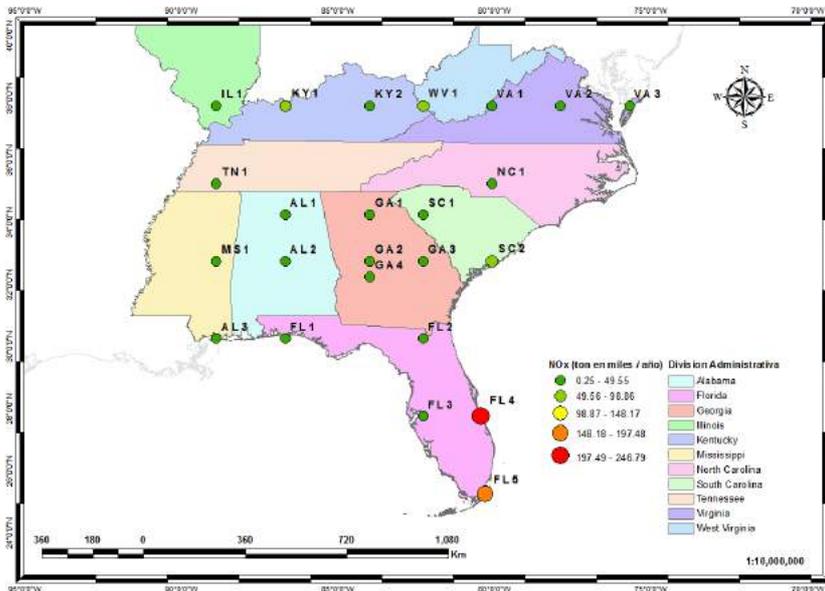
Id	Lat	Lon	# Ftes.
WV1	37°45	82°18	11

Id	Lat	Lon	# Ftes ⁰
KY1	37°45	86°42	22
KY2	37°45	84°30	22
KY3	37°45	82°18	2

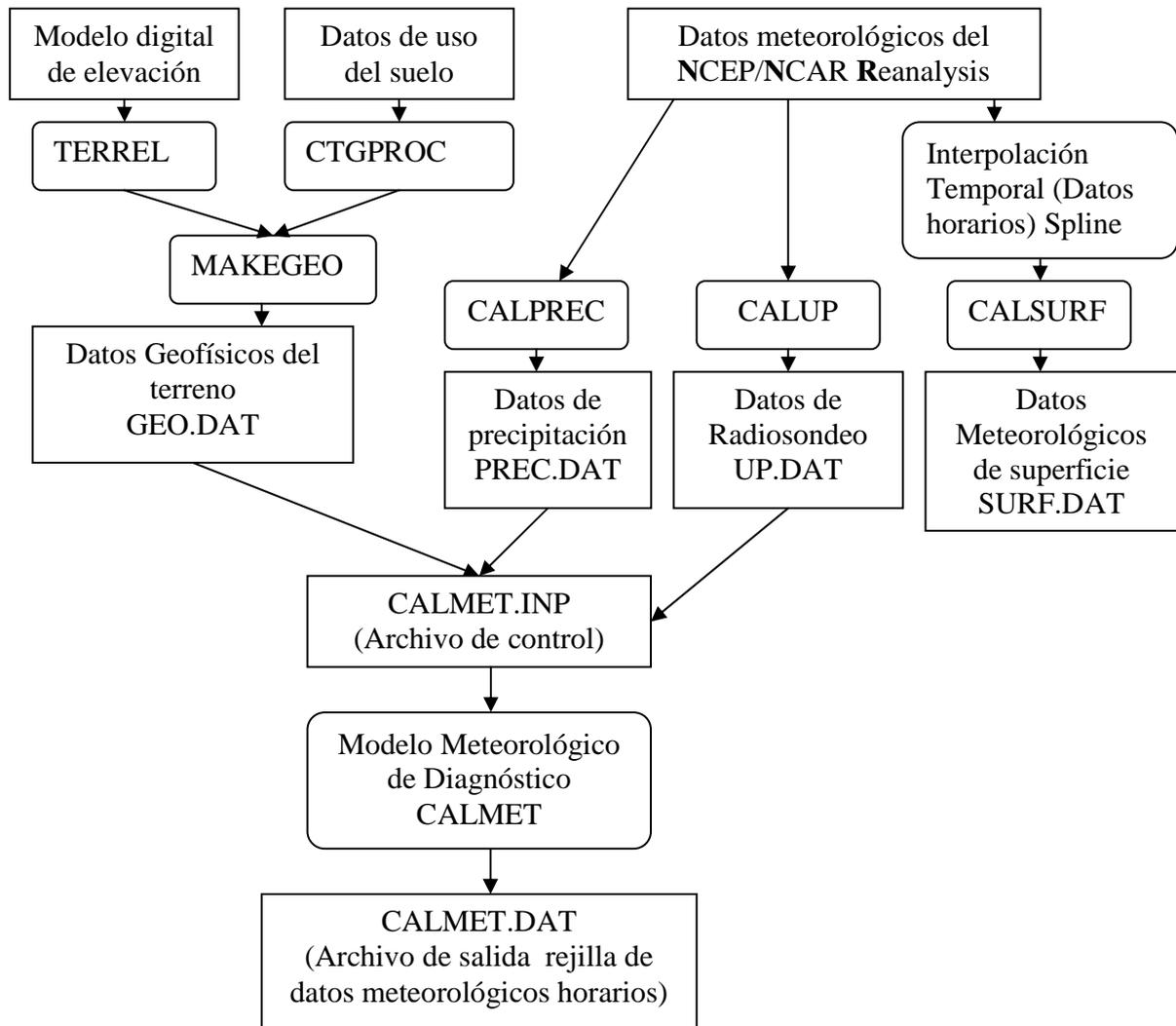
Id	Lat	Lon	# Ftes.
IL1	37°45	88°54	15

Id	Lat	Lon	Ftes
L1	22.45	82.18	4
L2	22.45	80.06	1
L3	22.45	77.54	1
L4	20.15	75.42	2

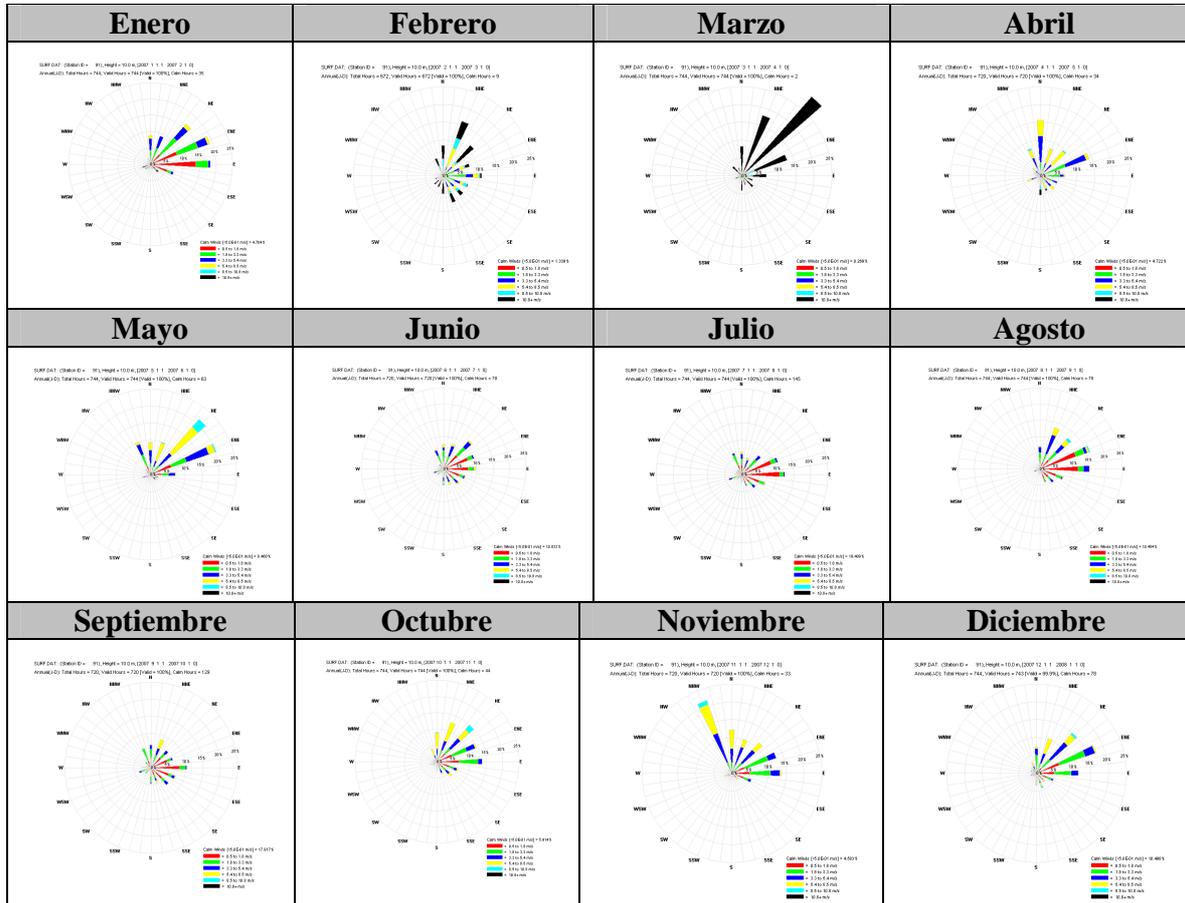
Anexo 3. Distribución espacial de las emisiones de NO_x y SO₂ provenientes de las fuentes externas (Sudeste de los Estados Unidos) 2007.



Anexo 5. Diagrama de flujo del funcionamiento del modelo CALMET

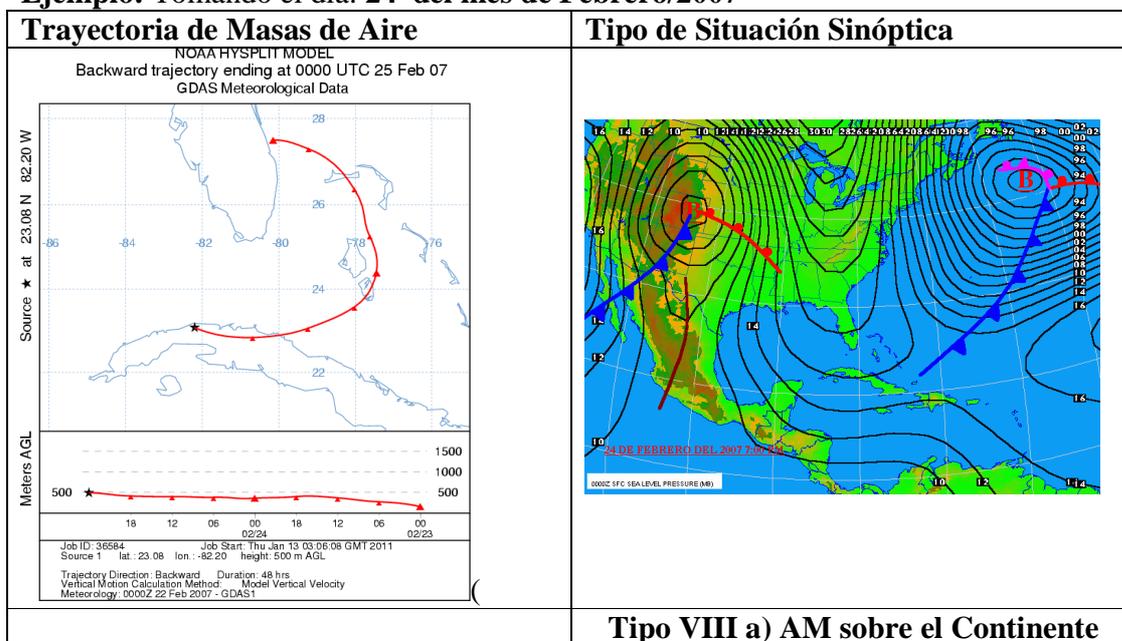


Anexo 6. Catálogo de Rosas de los Vientos Mensuales para la estación meteorológica de superficie, Casablanca en el año 2007, calculadas mediante el utilitario CALWindRose versión 4.8 del sistema de modelación CALPro.



Anexo 7. Condiciones meteorológicas favorables para la formación de ozono troposférico en Casablanca, La Habana.

Ejemplo: Tomando el día: 24 del mes de Febrero/2007



DIA	Mes	Hora	dd	N	Precip.	TSS	NO ₂ (µg/m ³)	NO(µg/m ³)	NOx(µg/m ³)	[NO ₂]/[NO]
24	2	7	90	1	0	9	0.19	0.001	0.19	209.9
24	2	8	93	2	0	9	0.21	0.007	0.22	29.8
24	2	9	97	4	0	9	0.26	0.021	0.29	12.3
24	2	10	100	5	0	9	0.34	0.035	0.38	9.7
24	2	11	80	5	0	9	0.47	0.057	0.53	8.2
24	2	12	60	4	0	9	0.67	0.087	0.75	7.7
24	2	13	40	4	0	9	0.75	0.102	0.85	7.4
24	2	14	40	3	0	9	0.78	0.108	0.89	7.3
24	2	15	40	2	0	9	0.92	0.114	1.03	8.1
24	2	16	40	1	0	9	1.11	0.102	1.21	10.9
24	2	17	50	1	0	9	1.51	0.064	1.57	23.6

Anexo 8. Gráficos del Flujo actínico horario para cada día seleccionado y la constante de fotólisis J.

Se muestra a continuación el flujo actínico por la hora: 8:00 AM, correspondiente a la fecha: 24/02/2007.

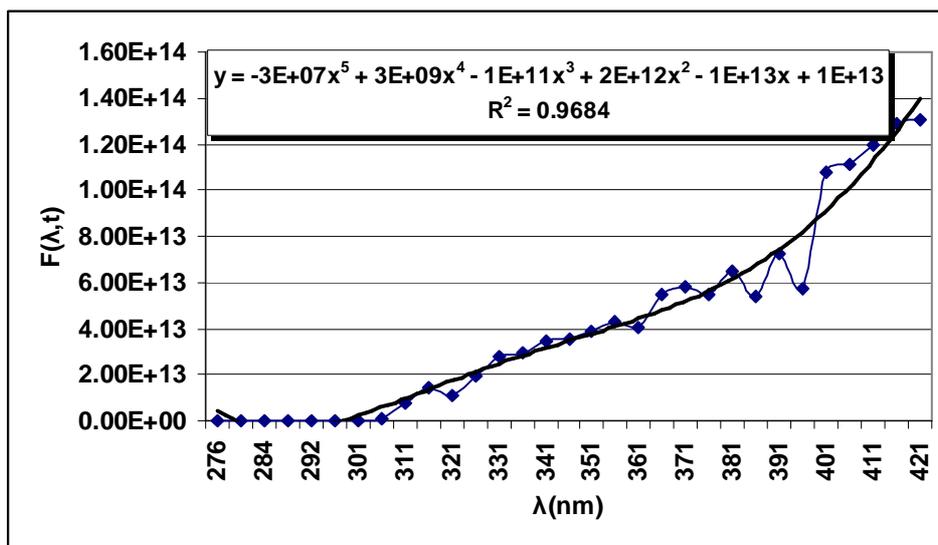


Figura 1. Flujo actínico para la hora 8:00 AM del día 24/02/2007 en Casablanca.

Se obtuvieron los flujos actínicos horarios (07 a las 17), correspondiente a cada una de las fechas seleccionadas.

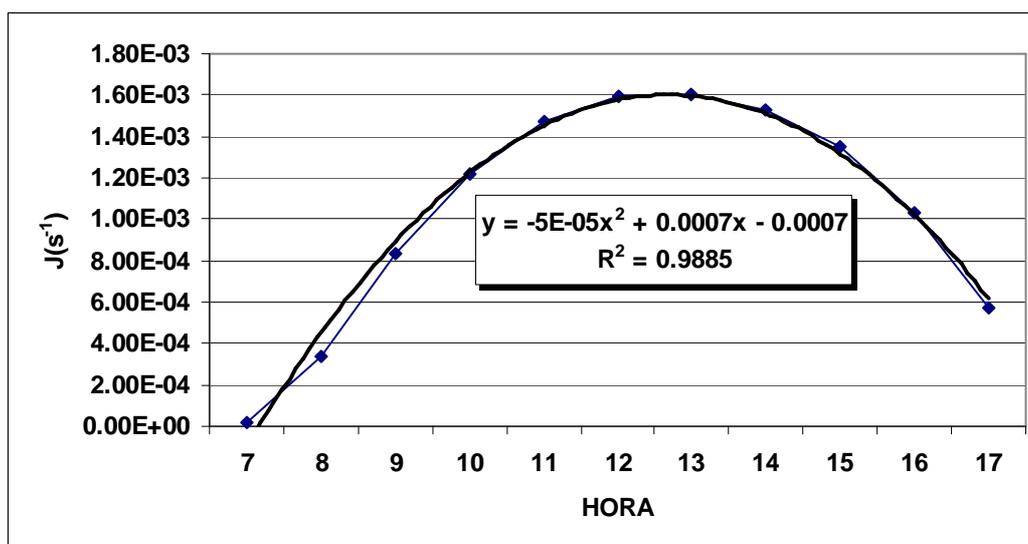


Figura 2. Constante de fotólisis J para el día 24/02/2007 en Casablanca.

Anexo 9. Funciones de ajuste de los valores de sección de eficaz y rendimiento cuántico para el cálculo de la constante de fotólisis de la molécula de NO₂.

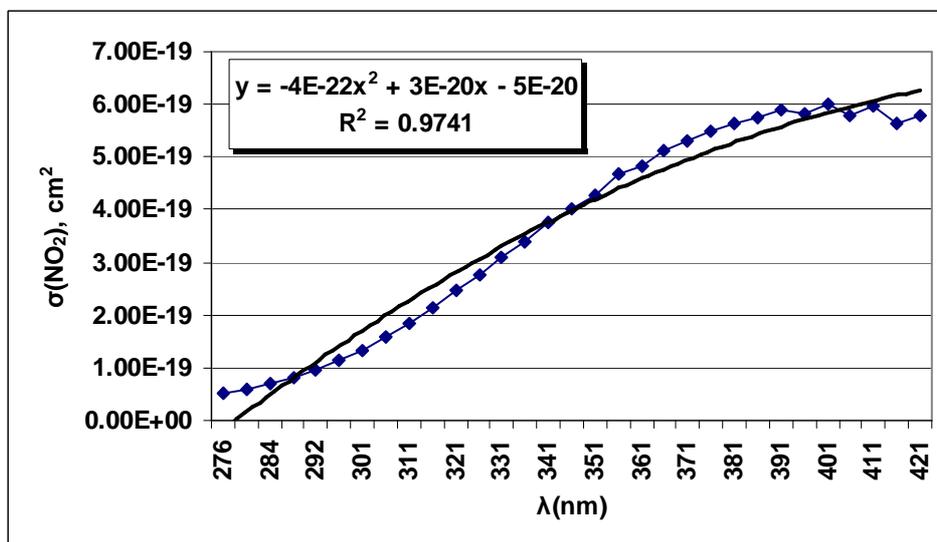


Figura 1. Sección eficaz vs. Rangos de longitudes de onda

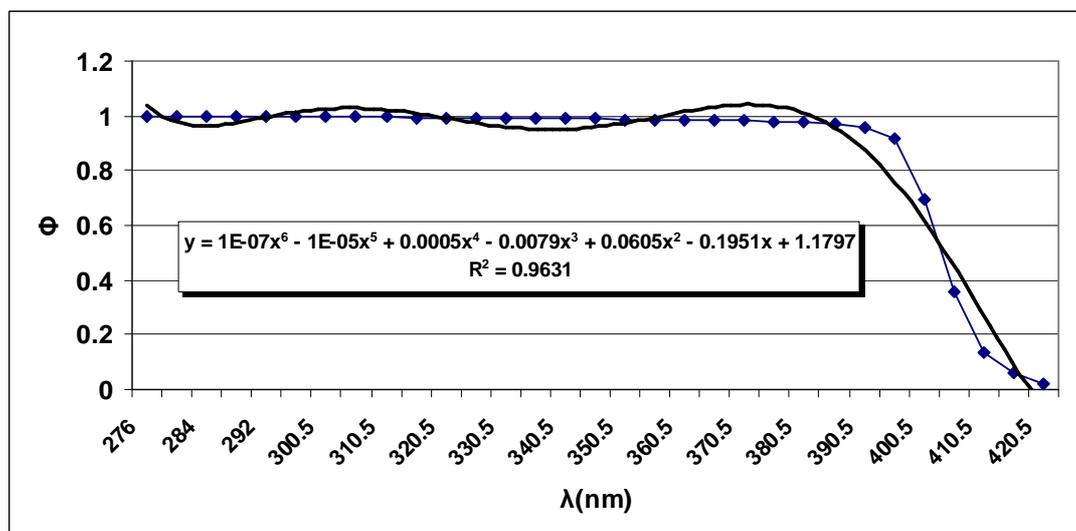


Figura 2. Rendimiento cuántico vs. Rangos de longitudes de onda

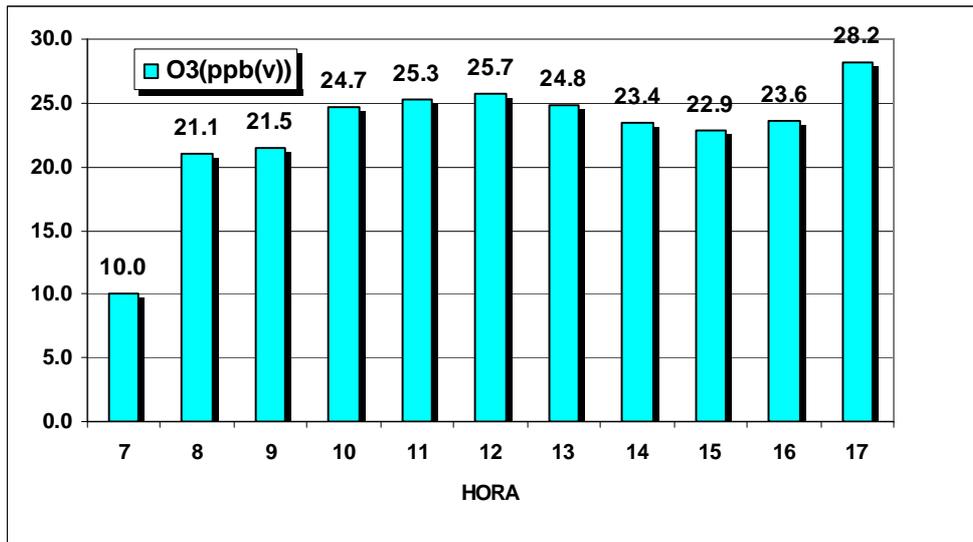
Anexo 10. Prueba de sensibilidad en los cambios de las tasas de emisión de NO_x a partir del modelo CALPUFF/CALPOST

Caso 1) Considerando las emisiones de NO_x de entrada al modelo como 90% de NO₂ y 10% de NO, respectivamente:

Día	Mes	HH	J _{NO₂} , s ⁻¹	k	NO ₂ (µg/m ³)	NO(µg/m ³)	NO ₂ (ppb(v))	NO(ppb(v))	[NO ₂]/[NO]
24	2	7	2.27E-05	1.90E-14	0.1940286	0.00092456	0.0970143	0.0004623	209.9
24	2	8	3.37E-04	1.90E-14	0.2176783	0.00731294	0.10883915	0.0036565	29.8
24	2	9	8.33E-04	1.90E-14	0.2646763	0.02148817	0.13233815	0.0107441	12.3
24	2	10	1.21E-03	1.90E-14	0.3440519	0.03546313	0.17202595	0.0177316	9.7
24	2	11	1.47E-03	1.90E-14	0.4688731	0.05706736	0.23443655	0.0285337	8.2
24	2	12	1.59E-03	1.90E-14	0.6671619	0.0867051	0.33358095	0.0433526	7.7
24	2	13	1.61E-03	1.90E-14	0.7508213	0.1019813	0.37541065	0.0509907	7.4
24	2	14	1.53E-03	1.90E-14	0.7868858	0.1077876	0.3934429	0.0538938	7.3
24	2	15	1.35E-03	1.90E-14	0.9199287	0.1136931	0.45996435	0.0568466	8.1
24	2	16	1.03E-03	1.90E-14	1.111042	0.1020033	0.555521	0.0510017	10.9
24	2	17	5.71E-04	1.90E-14	1.5107	0.06409381	0.75535	0.0320469	23.6

Caso 2) Considerando las emisiones de NO_x de entrada al modelo como 60% de NO₂ y 40% de NO, respectivamente:

Día	Mes	HH	J _{NO₂} , s ⁻¹	k	NO ₂ (µg/m ³)	NO(µg/m ³)	NO ₂ (ppb)	NO(ppb)	[NO ₂]/[NO]
24	2	7	2.27E-05	1.90E-14	0.236103	0.00112726	0.1180515	0.001	209.4
24	2	8	3.37E-04	1.90E-14	0.2641638	0.00885226	0.1320819	0.004	29.8
24	2	9	8.33E-04	1.90E-14	0.318538	0.02585674	0.159269	0.013	12.3
24	2	10	1.21E-03	1.90E-14	0.4118458	0.04245169	0.2059229	0.021	9.7
24	2	11	1.47E-03	1.90E-14	0.5503412	0.06696907	0.2751706	0.033	8.2
24	2	12	1.59E-03	1.90E-14	0.7678772	0.09977993	0.3839386	0.049	7.7
24	2	13	1.61E-03	1.90E-14	0.8565089	0.1163237	0.42825445	0.058	7.4
24	2	14	1.53E-03	1.90E-14	0.8944057	0.1225093	0.44720285	0.061	7.3
24	2	15	1.35E-03	1.90E-14	1.044468	0.1290891	0.522234	0.065	8.1
24	2	16	1.03E-03	1.90E-14	1.263624	0.1160076	0.631812	0.058	10.9
24	2	17	5.71E-04	1.90E-14	1.816239	0.07751542	0.9081195	0.038	23.4



Y los valores de las concentraciones de NO₂ y NO se representan en la figura siguiente:

