

La dispersión atmosférica de contaminantes en una zona industrial de Cuba

Feliberto de la Cruz-Monte de Oca, Norma Raisa Furet-Bridón,* Leonor Turtós-Carbonell y Mercedes Lorente-Vera*****

Centro de Estudios Avanzados, carretera San Antonio de los Baños kilómetro 1 ½, La Lisa, La Habana, Cuba, feliberto.cm@cea.cu
*Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, Avenida Salvador Allende esquina a Luaces, Plaza de la Revolución, La Habana, Cuba. **CUBAENERGÍA, Calle 20 No. 4111 entre calles 18-A y 47 Playa, La Habana, Cuba. ***Instituto de Meteorología, sede Santiago de Cuba, CITMA, Calle 17 esquina a Cuarta No. 452, Reparto Vista Alegre, Santiago de Cuba.

Recibido: 12 de enero de 2011

Aceptado: 7 de junio de 2011

Palabras clave: dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, material particulado, sistema AERMOD, ambiente de modelación.
Key words: sulphur dioxide, nitrogen oxides, particles, AERMOD, modeling sceneries.

RESUMEN. La contaminación atmosférica por diferentes sustancias químicas presenta en la actualidad, una gran connotación en el mundo entero, dado los efectos nocivos sobre los ecosistemas y en particular, sobre la salud humana y materiales metálicos. El desarrollo urbano, la modificación de la superficie de la tierra y el cambio climático son fenómenos derivados de una explosión demográfica mundial y están alterando la composición del aire. La atmósfera deposita contaminantes en los cursos de agua y en la tierra, lo que perjudica no solamente a las personas, sino también, a los animales y las plantas del ecosistema. El conocimiento de cómo estos contaminantes se dispersan en la atmósfera resulta de gran importancia en el establecimiento de mejores predicciones urbanas, regionales y mundiales de la calidad del aire. El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar la dispersión local de los contaminantes: dióxido de azufre (SO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x) y material particulado provenientes de una zona industrial. El estudio se realizó mediante el Sistema de Modelos de Dispersión Gaussiana de contaminantes AERMOD. Para la evaluación de los contaminantes, se analizaron dos ambientes de modelación: urbano y rural. Se determinaron las concentraciones de SO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) durante 1 h y 24 h y en un período de 1 año, que superaban los límites permisibles (500, 50 y 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Igualmente, se registró para cada período el número de ocasiones en que las concentraciones de SO_2 superaron las de referencia en cada uno de los ambientes analizados (urbano: 39, 61 y 39; rural: 99, 75 y 25). Se encontró que en el período de un año de modelación en 39 receptores (ocupando un área de 9,75 km^2 en el ambiente urbano) las concentraciones superaron las de referencia e igualmente en el caso del ambiente rural, en 25 receptores (para un área de 6,25 km^2). Para los contaminantes NO_x y el material particulado, las concentraciones estimadas se encontraron siempre por debajo de las de referencia. Se demuestra la potencialidad del sistema AERMOD en el estudio de la dispersión de contaminantes atmosféricos para el caso estudiado.

ABSTRACT. Air pollution by different chemicals; take a great connotation in the world, given the adverse effects on ecosystems and particularly human health. The urban development, the modification of the land surface and the climate change, phenomena derived from a world population explosion, are altering the composition of the air. The atmosphere deposits pollutants in the water courses and in land, which harms not only the persons, but also to the animals and the plants of the ecosystem. To know as these pollutants are dispersed in the atmosphere it is very important in the establishment of better urban, regional and world predictions of the air quality. The present study aims to assess the local spread of sulphur dioxide, nitrogen oxides and particulate matter from an industrial zone. The study was done using the pollutant Gaussian Dispersion Models AERMOD. For the evaluation of contaminants were considered two modeling scenarios: urban and rural. The SO_2 concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) were obtained for 1 h, 24 h and all period (1 year), exceeding the permissible limits (500, 50 y 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). It was also recorded for each period the number of times SO_2 concentrations exceeded the reference values in each of the scenarios discussed (urban: 39, 61 y 39; rural: 99, 75 y 25). At the end of modeling in the urban setting, 39 recipients exceeded the reference value, occupying an area of 9.75 km^2 and 25 receivers in the case of the rural setting, for an area of 6.25 km^2 . For NO_x and particulate matter concentrations estimated values were always below the reference values. The obtained results in this case show the potentiality of AERMOD system for the evaluation of atmospheric dispersion of pollutants.

INTRODUCCIÓN

Se denomina "contaminantes criterio", al conjunto de trazas constituido por dióxido de azufre (SO_2), dióxido de nitrógeno (NO_2), ozono (O_3), monóxido de carbono (CO) y los aerosoles.¹ Es importante considerar que estos no son los únicos contaminantes, pero sí son aquellos a los

que internacionalmente la gestión ambiental ha dado mayor atención, regulando las concentraciones máximas permisibles en la atmósfera para cada uno de ellos. Los contaminantes químicos atmosféricos son capaces de ejercer un amplio espectro de efectos agudos y crónicos sobre la salud, los cuales incluyen desde la disminución

de la función pulmonar a nivel subclínico en los niños y en la población sana,² hasta el incremento de la prevalencia y los síntomas de enfermedades respiratorias obstructivas crónicas (EPOC), tales como bronquitis crónica y enfisema, así como cardiopatía isquémica,³ con aumento de la mortalidad aguda y crónica por estas causas,⁴ e incluso de la incidencia de cáncer pulmonar.⁵

Por otro lado, la acción de los contaminantes atmosféricos sobre las estructuras metálicas en construcciones de hormigón armado, etc., es uno de los mayores problemas de corrosión,⁶⁻⁸ que provoca la búsqueda de medidas de protección de estos materiales.

Es importante también, tener en cuenta que los agentes contaminantes que se vierten a la atmósfera pueden reaccionar entre sí, al menos muchos de ellos para dar lugar a compuestos de actividad más o menos intensa y de mayor o menor nocividad. Se establece entonces, un efecto de sinergia o aumento de la perturbación entre compuestos, que se agudiza sobre todo, en las ciudades o en los polígonos de desarrollo industrial, lugares en los que las emisiones son diversas y los agentes se mezclan al difundirse en el aire. Las concentraciones de dióxido de azufre, que disminuyen en la mayor parte del mundo y el aumento de las de óxidos de nitrógeno han creado una nueva situación entre los contaminantes, cuya interacción, es muy importante sobre el cambio climático.^{9,10} Las interacciones entre los productos vertidos a la atmósfera se deben a mecanismos de acción complejos, como pueden ser reacciones fotoquímicas, de oxidación-reducción, catálisis, polimerización, etc. Por tal motivo, se hace necesaria la determinación de la concentración de los contaminantes de la atmósfera que influyen en el deterioro de los materiales de construcción, y que provocan además, efectos dañinos en la salud.

Sin embargo, no siempre se cuenta con equipamiento que permita la determinación directa de los contaminantes atmosféricos, y en algunos casos, con el empleo de los métodos de análisis¹¹⁻¹⁵ recomendados por las normas internacionales (ISO 9225) para medir los compuestos de azufre, se obtienen diferentes resultados en las velocidades de deposición de estos contaminantes.^{16,17}

Mediante el estudio de la dispersión de las sustancias químicas en la atmósfera, es posible valorar la presencia de un contaminante y si este sobrepasa o no los límites permisibles establecidos para la vida del hombre.^{18,19}

La dispersión atmosférica de los contaminantes puede ser estudiada en un área local, comprendida en un radio de hasta 50 km. de la fuente. La simulación, con el uso de programas de computación, es uno de los métodos que permite estudiar la dispersión de los contaminantes atmosféricos²⁰ cuando no es posible contar con la medición directa. Este es el caso del Sistema de Modelos de Dispersión Gaussiana de contaminantes AERMOD. En Cuba, se han comenzado los primeros trabajos de investigación con el uso de sistemas de Modelación que permiten la valoración de la dispersión de la contaminación en diferentes ambientes.²¹

El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar la dispersión local del SO₂, óxidos de nitrógeno y el material particulado provenientes de una zona industrial (alrededor de una refinería) de la provincia de Santiago de Cuba. El estudio se realizó empleando el Sistema de Modelos AERMOD. Para la evaluación de los contaminantes se analizaron dos ambientes de modelación: urbano y rural.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la simulación de la dispersión atmosférica de los contaminantes se escogió el sistema de modelos de

dispersión AERMOD, que es un sistema de modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos recomendado por la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) para la evaluación de la dispersión de contaminantes atmosféricos desde fuentes fijas.²² Este sistema de modelos, simula procesos atmosféricos físicos esenciales para proveer estimaciones refinadas de concentración sobre un amplio intervalo de condiciones meteorológicas y ambientes de modelación. Incluye un programa central denominado también AERMOD y dos pre-procesadores de datos, AERMET y AERMAP.^{23,24}

Selección del ambiente

La selección del ambiente urbano se realizó según uno de los métodos de Auer especificado en US EPA.²⁵ El primer método define un área como urbana, si tiene menos de un 35 % de su superficie cubierta por vegetación, o si en un círculo de 3 km de radio, centrado en la chimenea o en el centroide del polígono (formado por todas las fuentes a evaluar), las categorías urbanas (industria ligera, industria pesada, zona comercial y zona residencial) de uso de la tierra suman 50 % o más del área total.

A partir del segundo método de Auer, se analizó una imagen satelital descargada de *Google Earth*. Una aplicación en *MATLAB 7.0*, generada en el presente trabajo, permitió procesar la imagen. Para esto, se definió una escala de colores en correspondencia con el uso del suelo observado y se obtuvo: urbano = 50, 782 % y rural = 49,218 %. Debido a la similitud de los resultados correspondientes en cada ambiente, se decidió correr el modelo en ambos. Los datos de población, requeridos por AERMOD en el dominio a modelar, fueron tomados del sitio web de la Oficina Nacional de Estadísticas.²⁶ actualizados en el 2008.

Los contaminantes analizados fueron SO₂, NO_x y material particulado (MP). Por las características del modelo utilizado, AERMOD, la modelación de cada uno de los contaminantes fue independiente de los otros. Las características de las fuentes modeladas y los datos de emisión se presentan en la tesis en opción al grado de Ingeniería en Tecnologías Nucleares.²⁷

Normas utilizadas

Los valores de referencia (Tabla 1) utilizados para comparar las concentraciones de los contaminantes en períodos de 1 y 24 h, fueron los establecidos en las normas cubanas.^{28,29} Para un período de 1 año (Tabla 1), fueron tomados los valores guías propuestos por la Organización Mundial de la Salud,³⁰ pues la norma cubana no establece concentraciones máximas admisibles para los promedios anuales.

Un indicador importante para el análisis, es el número de ocasiones en que se superan los valores de referencia y el porcentaje que representa este valor, respecto al total de evaluaciones. Este número de ocasiones, se determina para cada período evaluado (para 1 año, diario, horario) comparando todas las concentraciones obtenidas con la de referencia para ese período. El porcentaje se determina dividiendo el número de veces en que se superan las concentraciones de referencia para ese período, entre la cantidad de evaluaciones o concentraciones calculadas en el período.

Los receptores (lugar donde se determina la concentración del contaminante), en los que se obtienen las concentraciones más elevadas de SO₂ y que al mismo tiempo superan las de referencias en un mayor número de ocasiones, se les denomina receptores críticos.

Tabla 1. Períodos de modelación y concentraciones de referencia

Contaminante	Período	Concentración [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Fuente de información
SO_2	1 h	500	NC 111-2002
	24 h	50	NC 39-1999
	promedio anual	20	OMS-2005
NO_x	1 h	85	NC 111-2002
	24 h	40	NC 39-1999
	promedio anual	40	OMS-2005
MP	1 h	300	NC 111-2002
	24 h	100	NC 111-2002
	promedio anual	50	OMS-2005

NO_x Óxidos de nitrógenos. MP Material particulado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Concentraciones máximas de los contaminantes

La concentración máxima promedio (Tabla 2) del contaminante SO_2 durante el período de 1 año, fue de $1293,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el ambiente rural, calculada para algún receptor del dominio local. También se determinaron las concentraciones máximas diaria y horaria, estimadas para los restantes contaminantes en al menos un punto receptor del dominio local, al menos un día y una hora respectivamente del período evaluado. Se observa bajas concentraciones para el contaminante NO_x en ambos ambientes, no superando las concentraciones de referencia. Estas concentraciones NO_x obtenidas no superan los valores reportados en el estudio realizado por Martin y cols,³¹ donde se encontraron concentraciones media mayores de $16,7292 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Particularmente, para 24 h y para todo el período, los valores encontrados en este trabajo (2,76 para urbano y 1,49 3,72 para el ambiente rural) están muy por debajo, de los valores medios reportados por Martin y cols. para Ciudad de La Habana.

Para el material particulado sólido, las concentraciones máximas no superan las de referencia (Tabla 2) en ambos ambientes, por lo que este contaminante no es un factor que afecta la calidad del aire en esta localidad.

Sin embargo, la evaluación solamente de las concentraciones máximas de los contaminantes no permite tener una idea exacta de la magnitud de las afectaciones de la calidad del aire, por tal motivo, se determinaron indicadores, tales como el número de ocasiones en que se superaban los valores de referencia y el porcentaje que representaba este valor, respecto al total de evaluaciones.

El número de evaluaciones realizadas, para cada ambiente y para cada contaminante, correspondientes a cada período (Tabla 3), se describe a continuación:

La grilla (o red) escogida fue de 900 receptores. Para el período de 1 año, el modelo realiza justamente 900 evaluaciones (una para cada receptor). En el período de 1 d, el modelo realiza 900×365 evaluaciones, o sea, 328 500 concentraciones y en el período de 1 h, se evaluaron 2 628 000 concentraciones ($900 \times 365 \times 24$). Si en el período de 1 h, se superan los valores de referencia en 39 veces para el ambiente urbano, el porcentaje en que se superan los valores de referencia sería:

$$\frac{39}{2628000} \cdot 100 = 1,5E - 3$$

En correspondencia con estos resultados, es posible plantear que las afectaciones atmosféricas más importantes se debieron al contaminante SO_2 . La información numérica se complementa con un mapa de isolíneas de concentración promedio anual de SO_2 en los ambientes urbano y rural, alcanzadas en cada receptor y debido a las emisiones de todas las fuentes (Figuras 1 y 2).

Los mayores niveles de concentraciones promedios (1 año), se localizaron en la cercanía de las fuentes (Figuras 1 y 2). Esta situación se debe principalmente, a que los vientos que arrastran el contaminante presentan una velocidad relativamente baja ($< 3 \text{ m/s}$).

Contaminante SO_2

Ambiente urbano

Para el ambiente urbano las concentraciones estimadas de SO_2 se caracterizaron por tener una concentración máxima promedio, en todo el período, superior en cuatro veces al valor de referencia ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y en un total de 39 receptores, de los 900 evaluados, se encontró una concentración mayor que dicha referencia. Estos receptores ocuparon un área de $9,75 \text{ km}^2$.

Por otro lado, la concentración máxima diaria, en todo el dominio, rebasa el valor de referencia ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en tres veces. Al analizar 9 receptores, de los 900 evaluados, se encontró que la concentración era mayor que la referencia, en al menos un día y de las 328 500 concentraciones diarias calculadas, 61 resultaron ser mayores que la referencia, lo que representa un 0,019 %.

Al analizar la concentración máxima horaria, en todo el dominio, se encontró como resultado, que su valor rebasa el valor de referencia ($500 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en 1,5 veces. En un receptor, de los 900 evaluados, la concentración de SO_2 es mayor que dicha referencia y de las 2 628 000 concentraciones horarias calculadas, 39 son mayores que la referencia, lo que representa un 0,0015 %.

Ambiente rural

En el ambiente rural, los valores estimados de concentración de los contaminantes en el período se comportaron de forma similar a los estimados en el escenario urbano, aunque los máximos horarios y diarios superaron, aún más, los valores de referencia.

Para este ambiente rural, la concentración máxima promedio de SO_2 , en todo el período, rebasó el valor de referencia ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en cuatro veces y en un total de 25 receptores,

Tabla 2. Concentraciones máximas de los contaminantes en los ambientes urbano y rural durante tres períodos

Contaminante	Ambiente		Período de tiempo		
			1 h	24 h	Todo el período
SO ₂	Urbano	Máx [µg/m ³]	752,99	152,36	80,93
		Máx/Ref [%]	150,59	304,72	404,65
	Rural	Máx [µg/m ³]	1293,6	196,64	80,57
		Máx/Ref [%]	258,72	393,28	402,85
NO _x	Urbano	Máx [µg/m ³]	13,66	2,76	1,49
		Máx/Ref [%]	16,07	6,90	3,72
	Rural	Máx [µg/m ³]	24,09	3,57	1,48
		Máx/Ref [%]	28,34	8,92	3,70
MP	Urbano	Máx [µg/m ³]	16,52	3,31	1,93
		Máx/Ref [%]	5,50	3,31	3,86
	Rural	Máx [µg/m ³]	27,23	3,92	1,92
		Máx/Ref [%]	9,07	3,92	3,84

NO_x Óxidos de nitrógeno. MP Material particulado.

Tabla 3. Número de ocasiones y porcentaje de evaluaciones, en las que se superaron las concentraciones de referencia de los contaminantes

Evaluaciones			2 628 000	328 500	900
Contaminante	Ambiente		1 h	24 h	Todo el período
SO ₂	Urbano	Cantidad	39	61	39
		[%]	1,5E-3	0,019	4,33
	Rural	Cantidad	99	75	25
		[%]	3,8E-3	0,023	2,78
NO _x	Urbano	Cantidad	0	0	0
		[%]	0	0	0
	Rural	Cantidad	0	0	0
		[%]	0	0	0
MP	Urbano	Cantidad	0	0	0
		[%]	0	0	0
	Rural	Cantidad	0	0	0
		[%]	0	0	0

NO_x Óxidos de nitrógeno. MP Material particulado.

de los 900 evaluados, fue mayor que dicha referencia. Estos receptores ocuparon un área de 6,25 km².

La concentración máxima diaria, en todo el dominio, rebasó el valor de referencia (50 µg/m³) en casi cuatro veces. En nueve receptores, de los 900 evaluados, fue mayor a la referencia en al menos un día y de las 328 500 concentraciones diarias calculadas, 75 fueron mayores a la referencia, lo que representó un 0,023 %.

La concentración máxima horaria en todo el dominio rebasa el valor de referencia (500 µg/m³) en 2,6 veces. En nueve receptores de los 900 evaluados fue mayor que dicha referencia y de las 2 628 000 concentraciones horarias calculadas, 99 fueron mayores a la referencia, lo que representó un 0,004 %.

Las diferencias obtenidas entre los ambientes urbano y rural, se debe, a que en el primero (urbano) los efectos

de la turbulencia convectiva en la dispersión de la pluma durante las horas nocturnas, son tenidos en cuenta. El considerar estos efectos, permite que en el ambiente rural sean obtenidas concentraciones superiores que en el urbano, al no existir una gran dilución de los contaminantes en la pluma.

Contaminante NO_x

El óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂) se suelen considerar en conjunto con la denominación de NO_x. Son contaminantes primarios que en algunos casos son de mucha trascendencia en los problemas de contaminación. Sin embargo, en este trabajo, en ninguno de los ambientes analizados, las concentraciones de NO_x nunca superaron las de referencia citados por las normas y guía. Esto se debe a las pequeñas tasas de emisión en

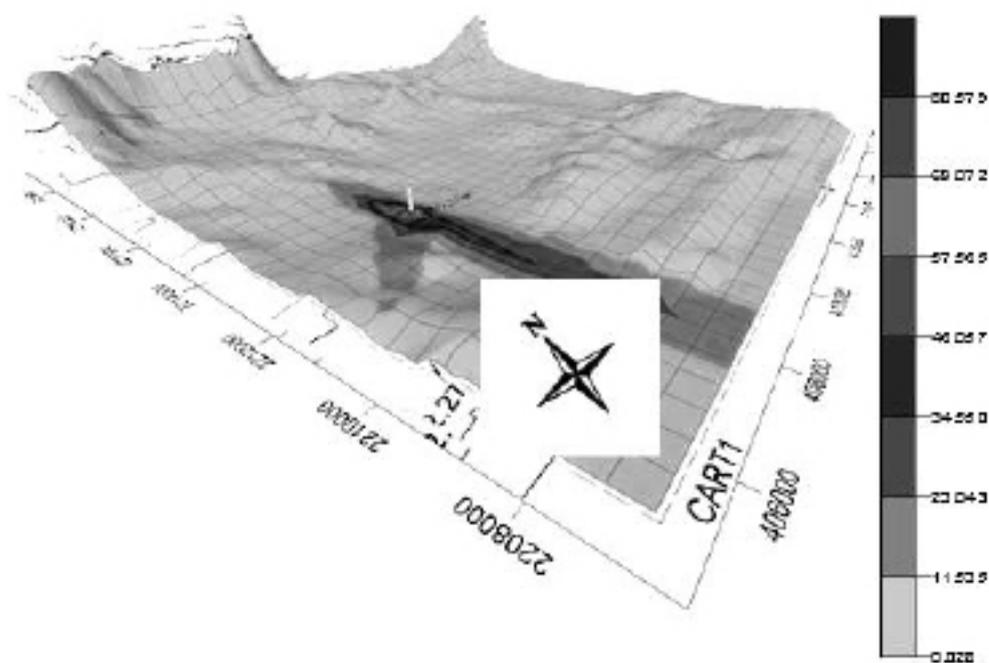


Fig. 1. Concentración promedio anual de SO_2 ($\mu g/m^3$). Escenario urbano.

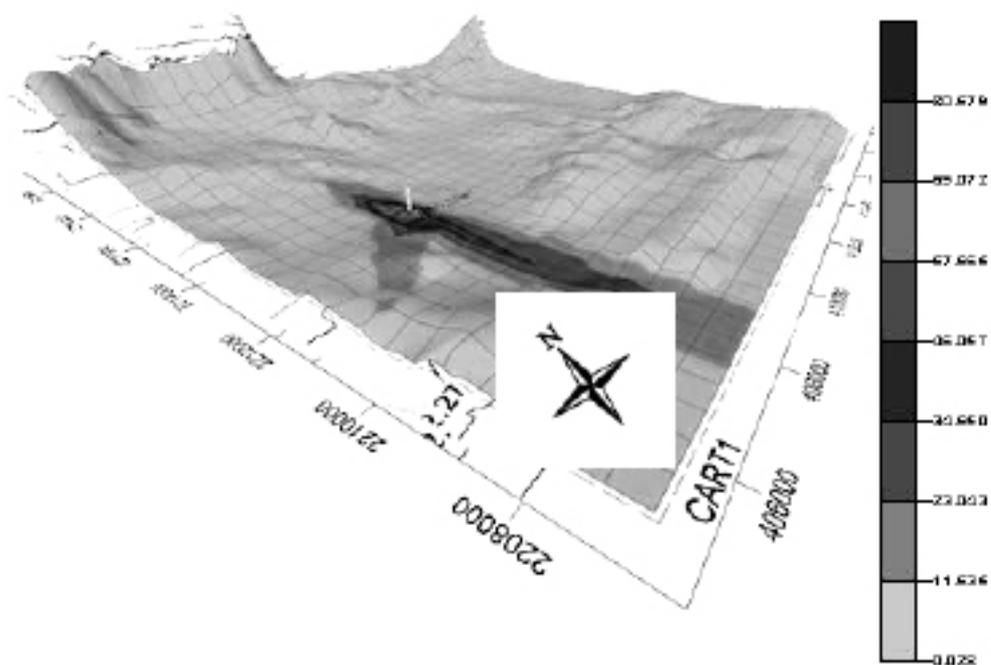


Fig. 2. Concentración promedio anual de SO_2 ($\mu g/m^3$). Escenario rural.

los grupos de calderas y hornos.²⁷ Por otro lado, de forma general, el contaminante emitido en más cantidad es el NO , pero sufre una rápida oxidación a NO_2 , siendo este el que predomina en la atmósfera. El NO_x tiene una vida corta y se oxida rápidamente a NO_3^- en forma de aerosol o a HNO_3 (ácido nítrico).

El encontrar concentraciones de NO_x por debajo de la referencia, es una situación alentadora debido a que este contaminante tiene una gran trascendencia en la formación del humo fotoquímico, del nitrato de peroxiacetilo (PAN) e influye en las reacciones de formación y destrucción del ozono, tanto troposférico como estratosférico, así como en el fenómeno de la lluvia

ácida. En concentraciones elevadas produce daños a la salud y a las plantas y corroe tejidos y materiales diversos. Las actividades humanas que los producen son, principalmente, las combustiones realizadas a elevadas temperaturas.

Partículas

Al igual que el contaminante NO_x para el material particulado, nunca se observaron violaciones respecto a los valores de referencias, en ninguno de los períodos de tiempo modelados para cada ambiente. Estos resultados se deben también, a los pequeños valores de emisión en los grupos de calderas y hornos.²⁷

Receptores críticos

Los receptores críticos determinados (en coordenadas UTM), en los que se obtienen las concentraciones más elevadas de SO₂ al mismo tiempo, superan las referencias en un mayor número de ocasiones (Tablas 4 y 5).

Las máximas concentraciones de SO₂ estimadas por el modelo, se localizaron en los receptores cercanos a las fuentes de emisión. Se observó, que en el receptor de coordenadas: X = 408 200, Y = 2 213 000, se registran las concentraciones de SO₂ donde NoS toma los mayores valores (91 para los máximos horarios y 47 para los máximos diarios). Dicho receptor se encontró aproximadamente a 187 m del centroide del polígono formado por las fuentes.

En este trabajo, el tiempo de emisión utilizado fue de 1 año, pero es posible ampliar este tiempo hasta 5 años, para analizar con mayor profundidad la cinética de los contaminantes, dado el impacto que tienen estos

Tabla 4. Receptores críticos de SO₂. Ambiente urbano

Período de Evaluación	Ubicación			
	X	Y	NoS ¹	%
1 h	408 200	2 213 000	39	100
24 h	408 200	2 213 000	34	55,73
	408 200	2 213 500	10	16,93

¹ Ocasiones que superan el valor de referencia correspondiente.
% Porcentaje que representa NoS del total de ocasiones que superan el valor de referencia.

Tabla 5. Receptores críticos de SO₂. Ambiente rural

Período de Evaluación	Ubicación			
	X	Y	NoS	%
1 h	408 200	2 213 000	91	91,91
24 h	408 200	2 212 000	5	6,7
	408 200	2 212 500	6	8
	408 200	2 213 000	47	62,7
	408 200	2 213 500	9	12

contaminantes sobre los materiales y la salud humana, los cuales son capaces de ejercer un amplio espectro de efectos agudos y crónicos en el ser humano.

CONCLUSIONES

Se realizó la modelación de la dispersión atmosférica de contaminantes provenientes de una zona industrial de Cuba, mediante el sistema de modelos de dispersión gaussiana AERMOD, obteniéndose valores máximos de concentración de SO₂ superiores a los permitidos para todos los períodos de tiempo estudiados (1 h, 24 h, 1 año), lo que ratifica la necesidad de realizar acciones para controlar las emisiones de SO₂.

Se encontró que las concentraciones de los otros contaminantes atmosféricos evaluados (NO_x y MP) no superaron los valores máximos permisibles en los períodos de tiempo considerados.

Se evidenció que la elección del ambiente de modelación (urbano o rural) es una variable de gran

peso en los resultados, por lo que es necesario realizar un estudio detallado del uso del suelo.

Se demostró la potencialidad del sistema AERMOD en el caso estudiado en la evaluación de las concentraciones de contaminantes atmosféricos, el cual puede ser utilizado para el cumplimiento de un requisito esencial en las evaluaciones del impacto ambiental sobre la salud y en los análisis de riesgos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Seinfeld J, Pandis S. Atmospheric chemistry and physics. From air pollution to climate change, J. Wiley and Sons, Inc:1998:p.1203-05.
- World Health Organization. Health and environment in sustainable development. Five years after the Earth Summit. Executive summary. Geneva: WHO:1997: 9-30.
- Abbey D, Petersen F, Mills P, Kittle L. Chronic respiratory disease associated with long term ambient concentrations of sulphates and other air pollutants. JEAEE.1993;3:99-116.
- Pope C, Thun M, Namboodiri M, Dockery D, Evans J. Particulate air pollution as a predictor of mortality in a prospective study of US adults. Am J Respir Crit Care Med. 1995;51:699-704.
- Molina E, Barceló C, Bonito LA, Puerto C. Factores de riesgo de cáncer pulmonar en Ciudad de La Habana. Revista Cubana Higiene Epidemiología. 1996;34(2):81-90.
- Betancourt N, Corvo F, Cuesta O, Labrador R, González M L, Pérez J, and *et al.* Influence of SO₂ and NO_x on atmospheric corrosion of steel. Revista CENIC Ciencias Químicas. 2002;33(2):71-5.
- Martín Y, Corvo F, Castañeda A, Valdés C, González E, Pérez J, *et al.* Influencia de diferentes factores ambientales en la corrosión de metales que se emplean en la construcción de equipos eléctricos y electrónicos en Cuba. Revista CENIC Ciencias Químicas. 2007;38(1):219-25.
- Furet NR and Haces C. Corrosion rate determination using Mossbauer spectra of corrosion products steel. Journal Hyperfine Interactions. 1990;57:1833-38.
- Watson RT, Marufu C, Zinyowera RH, Dokken DJ. Regional impacts of climatic change: evaluation of vulnerability, Edited by Special information of Work Group II IPCC, November 1997.
- Kucera V, Bull KR, Achermann B, Bashkin V, Chrast, R, Fenech G and *et al.* Coordinated effects monitoring and modelling for developing and supporting international air pollution control agreements. Water, Air, and Soil Pollution.2001;130:119-30.
- Batchvarova E, Gryning S E,. Applied model for the growth of the daytime mixed layer. Boundary-Layer Meteorology. 1991;56:261-74.
- Gallardo L. Trazas atmosféricas y su modelación. Borrador. En: Morales R and *et al.* Santiago de Chile. CENMA ed: 2003;24(3).
- Lavoisier A, Traité élémentaire de chimie, présenté dans un ordre nouveau et d'après les découvertes modernes, 2 vols. Paris, Chez Cuchet. 1989.
- Roque A, Soltura O, Báez R, Calzadilla A, Fernández K, de la Hoz V and *et al.* Red de Torres Meteorológicas de Referencia para el Programa Eólico Cubano. Resultados preliminares del Estudio del Viento con Fines Energéticos. 2008. [Consultado 19 enero 2009]. Disponible en: www.ame-web.org/JORNADAS/6A_Roque.pdf
- Simpson M, Raman L J, Leach M, 2007. A study of the variation of urban mixed layer heights. Atmospheric Environment. 2007;41:6923-30.
- Bustos C. Aplicación de modelos de dispersión atmosférica en la evaluación de impacto ambiental: Análisis del proceso. Tesis en opción del título de Maestría. Santiago de Chile, Universidad de Chile, Cap.1, 12-39. 2004.
- Chamberlain AC. Aspects of travel and deposition of aerosol and vapor clouds. Atomic Energy Research Establishment, Harwell, Berkshire, U.K. 1953:AERE Report H.PI:1261-65.
- Calesso E, Ramos E, Flavio W, Fachel J. Measurement of surface ozone and its precursors in an urban area in South Brazil. Atmospheric Environment. 2009;43: 2213-20.

19. Barrett S, Britter Rex E. Development of algorithms and approximations for rapid operational air quality modelling. *Atmospheric Environment*. 2008;42:8105-11.
20. Hogan RW. Atmospheric Dispersion Modeling in Biosurveillance. *Handbook of Biosurveillance*. 1st ed. Academia Press in Boston. Cap.19. 2007.
21. Turtós L, Fernández MS. 2007. Estudio de dispersión local del proceso de modernización de las centrales eléctricas. Contrato SCT Gases Emitidos por Moa Nickel S.A. Contrato SCT No.03/2007. 2007.
22. Cimorelli AJ, Perry SG, Venkatram A, Weil JC, Paine RJ, Wilson and *et al.* AERMOD: Description of model formulation, US Environmental Protection Agency, EPA Report No.454/R-03-004: 91, 2004.
23. Cimorelli AJ, Perry SG, Venkatram A, Weil J, Paine R, Wilson RB and *et al.* AERMOD: a dispersion model for industrial source applications. Part I: general model formulation and boundary layer characterization. *Journal of Applied Meteorology*. 2005;44:682-93.
24. Perry SG, Cimorelli AJ, Paine RJ, Brode RW, Weil JC, Venkatram A, and *et al.* AERMOD: a dispersion model for industrial source applications. Part II: model performance against 17 field study databases. *Journal of Applied Meteorology*. 2005;44:694-708.
25. US EPA, Revision to the Guideline on Air Quality Models: Adoption of a Preferred General Purpose (Flat and Complex Terrain) Dispersion Model and Other Revisions; Final Rule. 40 CFR Part; Volume 70, No. 216. 2005.
26. Oficina Nacional de Estadísticas (Consultado: abril de 2009). Disponible en: www.one.cu
27. De la Cruz F. Tesis en opción al título de Ingeniero en Tecnologías Nucleares. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, junio de 2009, La Habana, Cuba.
28. NC 39:1999: Sistema de Normas para la protección del Medio Ambiente, Atmósfera, Requisitos higiénicos sanitarios: Concentraciones máximas admisibles, alturas mínimas de expulsión y zonas de protección sanitaria. La Habana: Comité Estatal de Normalización.
29. NC 111: 2002: Calidad del aire – Reglas para la vigilancia de la calidad del aire en asentamientos humanos. La Habana. Oficina Nacional de Normalización.
30. World Health Organization. Air Quality Guidelines for Europe. 2nd ed. 2000; Cap. 3:32-40.
31. Martín Y, Schlater S, Díaz G y Portilla C. Determinación de la concentración de dióxido de nitrógeno en la atmósfera de Ciudad de La habana mediante captadores pasivos. *Revista CENIC Ciencias Químicas*. 2009;40(1):23-5.